



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

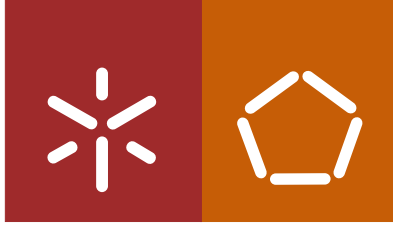
Sara Raquel Marques Fernandes

Desenvolvimento de Betumes Modificados Inovadores para Misturas Betuminosas Sustentáveis

Este trabalho foi financiado pelo Governo de Portugal e pelo Fundo Social Europeu da União Europeia (EU/FSE), através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), através de uma Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/98379/2013, e no âmbito do Programa Operacional Potencial Humano inscrito no Quadro de Referência Estratégico Nacional (POPH/QREN).

FCT
Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CIÊNCIA





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Sara Raquel Marques Fernandes

**Desenvolvimento de Betumes Modificados
Inovadores para Misturas Betuminosas
Sustentáveis**

Tese de Doutoramento em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva
e do
Professor Doutor Joel Ricardo Martins de Oliveira

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Sara Raquel Marques Fernandes, autora da presente Tese, declara ter atuado com integridade na sua elaboração. Confirma que em todo o trabalho conducente à sua elaboração não recorreu à prática de plágio ou a qualquer forma de falsificação de resultados.

Mais declara que tomou conhecimento integral do Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Universidade do Minho, 31 de janeiro de 2018

Assinatura: Sara Raquel Marques Fernandes

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por fundos FEDER através do Programa Operacional de Competitividade – COMPETE e por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito da bolsa de doutoramento SFRH/BD98379/2013, durante o período de 2014 a 2017.

No entanto, a realização deste trabalho só foi possível devido ao apoio e meios disponibilizados por um conjunto de entidades e pessoas, a quem gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos.

À Universidade do Minho, pela formação adquirida ao longo destes anos, assim como pelas condições e meios postos à disposição, essenciais para a realização deste trabalho. Mas em particular, gostaria de agradecer ao centro de investigação CTAC, mais concretamente à área de Sistemas e Infraestruturas de Transporte, que tornaram possível a realização deste trabalho, através de meios técnicos e humanos, permitindo também a realização de ensaios noutros departamentos que tanto contribuíram para a multidisciplinaridade presente neste trabalho

Ao Professor Doutor Hugo Silva e ao Professor Doutor Joel Oliveira, orientador e coorientador, respetivamente, quero expressar o meu profundo agradecimento por todos os ensinamentos, apoio, motivação e paciência demonstrados, mas acima de tudo por confiarem em mim, nas minhas ideias e no meu trabalho durante estes anos.

Ao Engenheiro Carlos Palha, Técnico do Laboratório de Engenharia Civil, pela ajuda e apoio na realização de algumas etapas importantes deste trabalho.

Ao Engenheiro Hélder Torres, Técnico do Laboratório de Engenharia Civil, mas sobretudo amigo, agradeço todo o apoio e confiança demonstradas, os *brainstormings* sobre este trabalho, e por estar sempre por perto mostrando que tudo ia chegar a bom porto. Obrigada pela força, paciência e pelas risadas.

À Professora Doutora Ana Vera Machado Nóbrega, ao Doutor Loic Hilliou e ao Engenheiro Maurício Malheiro, do Departamento de Engenharia de Polímeros, pelos conhecimentos transmitidos em áreas de estudo distintas e pela constante disponibilidade.

À Engenheira Irene Morais e ao Engenheiro Hugo Antoninho, Técnicos do Centro de Valorização de Resíduos, pelos recursos disponibilizados, pela colaboração demonstrada e conhecimentos transmitidos.

À Engenheira Marta Teixeira, Técnica do Laboratório de Engenharia Têxtil, pela prontidão em ajudar e pela generosidade na transmissão de conhecimentos.

Agradeço o apoio prestado pela CEPISA Portugal, Gintegral, RECIPNEU, FISIFE e Grupo Elevo através do fornecimento dos diferentes materiais utilizados neste trabalho, mas em especial à SOGILUB cujo fornecimento do óleo de motor usado e fundo de coluna tornaram este trabalho possível.

A todos os colegas e técnicos de laboratório com quem trabalhei durante estes quatro anos, mas em especial à Liliana Costa, Daniela Palha, Liliana Abreu, João Paulo e Andreia Martins por todo o conhecimento partilhado e pelo facto de estarem sempre presentes, acompanhando e motivando a realização deste trabalho.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, em particular ao Bruno, ao David, ao Hugo, ao João Peixoto, ao João Soares e à Margarida que sempre acreditaram que ia conseguir terminar este desafio, através do seu apoio e motivação, mostrando o verdadeiro sentido da palavra amizade.

À minha família, em especial à minha mãe, a quem não tenho palavras para agradecer todo o amor, apoio e confiança depositada em mim, ao meu irmão pela força e palavras de encorajamento, à minha sobrinha que me fazia muitas vezes esquecer as dificuldades deste percurso e, aos meus avós, que sempre mostraram um enorme orgulho em mim.

A ti Renato, agradeço a paciência demonstrada quando eu falava horas sobre este trabalho, pela força e motivação quando as coisas se tornavam mais difíceis, obrigada por estares sempre ao meu lado acreditando que seria capaz de terminar este objetivo.

Por último, dedico este trabalho ao meu pai, que sei que deve estar imensamente orgulhoso de mim, do meu trabalho e da pessoa que me tornei. Obrigada por cuidares sempre de mim.

Desenvolvimento de betumes modificados inovadores para misturas betuminosas sustentáveis

RESUMO

As novas metas ambientais no que concerne à conservação dos recursos naturais e à valorização de resíduos têm servido de motivação para vários estudos científicos de diferentes áreas de investigação. Nesse sentido, no domínio da indústria da pavimentação rodoviária, que consome imensos recursos naturais, tem sido investigada a incorporação de diferentes resíduos em misturas betuminosas de modo a desenvolver soluções mais sustentáveis. Sendo o betume um dos materiais mais valiosos utilizados na pavimentação é fundamental o estudo de novos ligantes que permitam reduzir a quantidade de betume novo utilizado, quer pela reutilização de betume envelhecido (reciclagem), quer pela adição de alguns resíduos, pelas vantagens económicas e ambientais associadas.

Deste modo, o principal objetivo deste trabalho consiste em desenvolver betumes inovadores que maximizem a utilização de resíduos, particularmente óleo de motor usado e fundo de coluna de destilação (substitutos parciais do betume), para a produção de misturas betuminosas convencionais e recicladas mais sustentáveis. Este trabalho pretende assim desenvolver novas soluções para pavimentação, que aliem o desempenho técnico e a viabilidade económica aos benefícios ambientais que resultam da utilização de resíduos industriais e material fresado em misturas betuminosas. Adicionalmente, pretende garantir-se que estas soluções com elevada incorporação de resíduos não apresentem riscos associados à sua utilização, quer ao nível dos seus lixiviados, quer das suas emissões de dióxido de carbono.

Para a concretização deste trabalho, foi realizada a caracterização térmica, química e física dos diferentes materiais a utilizar nos betumes modificados com resíduos e nas misturas betuminosas. Além disso, de modo a verificar a dispersão do polímero no betume com óleo de motor usado, foram avaliados através de microscopia de fluorescência diferentes procedimentos de produção dos betumes modificados. Desta forma, foi possível minimizar o tempo e/ou a temperatura de digestão e obter uma dispersão mais eficaz do polímero no betume com óleo de motor usado. Em seguida, os betumes modificados com várias percentagens dos diferentes resíduos (óleo/fundo de coluna e polímeros) foram avaliados através de ensaios de caracterização básica e reológica, tendo sido selecionados aqueles cujas características foram mais promissoras. Os betumes selecionados foram ainda avaliados a nível térmico, químico e quanto à

resistência ao envelhecimento. Em seguida, foram produzidas misturas convencionais e recicladas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA) com estes betumes inovadores modificados com resíduos, que foram avaliadas quanto ao seu desempenho mecânico e superficial. Finalmente, a sustentabilidade destas soluções foi analisada no que respeita à produção de lixiviados, emissões de dióxido de carbono, e quanto à sua viabilidade económica.

Os resultados deste estudo confirmam que os betumes inovadores modificados com resíduos desenvolvidos neste trabalho permitem produzir misturas convencionais e recicladas mais sustentáveis, que aliam um bom desempenho mecânico com benefícios económicos e ambientais. Estes betumes modificados com resíduos exibem menor suscetibilidade térmica, sendo mais resistentes à deformação permanente a elevadas temperaturas e mais flexíveis a temperaturas mais baixas. Quando utilizados nas misturas betuminosas, a maioria dos betumes modificados com resíduos aumenta a resistência à ação da água, à deformação permanente e ao fendilhamento por fadiga, sem comprometer as características superficiais das misturas.

Apesar de se ter desenvolvido neste trabalho vários ligantes inovadores mais sustentáveis do que o betume convencional, aqueles que apresentam os resultados mais promissores a nível mecânico, económico e ambiental são os betumes modificados com resíduos de polietileno de alta densidade e óleo de motor usado ou fundo de coluna. De facto, ao comparar estruturas de pavimentos com um desempenho equivalente, as misturas com estes ligantes apresentam em geral os custos e as emissões de dióxido de carbono mais baixos de todas as soluções analisadas.

Palavras-chave:

Betumes modificados

Óleo de motor usado

Fundo de coluna de destilação

Resíduos poliméricos

Caracterização avançada de betumes

Misturas *Stone Mastic Asphalt*

Misturas recicladas

Desempenho mecânico

Análise económica e ambiental

Development of innovative modified bitumens for sustainable asphalt mixtures

ABSTRACT

The new environmental targets related to conserving the natural resources and recovering the waste materials have been the basis for several scientific studies in different research areas. Therefore, in the road paving industry field, which consumes massive amounts of natural resources, the incorporation of different waste materials in asphalt mixtures has been investigated in order to develop more sustainable solutions. As bitumen is one of the most valuable materials used in pavements, the study of new binders that incorporate a lower amount of new bitumen is essential, both by reusing aged bitumen (recycling) and by adding some waste materials, due to the associated economic and environmental advantages.

Thus, the main aim of this study is the development of innovative modified bitumens that maximize the use of waste materials, especially waste engine oil and recycled engine oil bottoms (partial replacements for bitumen), to produce more sustainable conventional and recycled asphalt mixtures. With this work, new solutions for road paving materials, combining adequate performance and economic viability with environmental advantages that result from the use of industrial waste and reclaimed asphalt materials in asphalt mixtures, shall be developed. Ultimately, this work should assure that these solutions with high incorporation of waste materials do not present risks related to their use, either from their leachates or from their carbon dioxide emissions.

For the accomplishment of this work, thermal, chemical and physical characterisation of the materials used in the modified bitumens with waste materials and in the asphalt mixtures was carried out. Additionally, different bitumen modification procedures were evaluated through fluorescence microscopy tests to verify the polymer dispersion in the blend of bitumen and waste engine oil. Thus, it was possible to minimize the digestion time and/or temperature and to obtain a more effective polymer dispersion in the blend of bitumen and waste engine oil. Afterwards, several modified bitumens with different amounts of waste materials (waste engine oil/recycled engine oil bottoms and polymers) were evaluated through basic and rheological characterization, and those with the most promising properties were selected. The selected bitumens were further characterised regarding their thermal, chemical and aging resistance behaviour. Then, conventional and recycled Stone Mastic Asphalt (SMA) mixtures produced with those

innovative bitumens modified with waste materials were evaluated regarding their mechanical and surface performance. Finally, the sustainability of these solutions was analysed in relation to their leachates production, carbon dioxide emissions and economic viability.

The results from this study confirm that the innovative bitumens modified with waste materials developed in this work are able to produce more sustainable conventional and recycled asphalt mixtures, which combine a good mechanical performance with economic and environmental benefits. These binders present lower thermal susceptibility, being more resistant to permanent deformation at high temperatures and more flexible at lower temperatures. When used in asphalt mixtures, the majority of the bitumens modified with waste materials increases the water sensitivity, permanent deformation and fatigue cracking resistances, without compromising their surface characteristics.

Although several innovative binders that are more sustainable than the conventional bitumen have been developed in this study, those modified with waste high density polyethylene and waste engine oil or recycled engine oil bottoms have presented the most promising results at the mechanical, economic and environmental levels. Indeed, when comparing pavement structures with equivalent performance, the asphalt mixtures with these modified bitumens have generally shown the lowest costs and carbon dioxide emissions amongst all analysed solutions.

KEYWORDS:

Modified bitumens

Waste engine oil

Recycled engine oil bottoms

Waste polymers

Advanced characterization of bitumens

Stone Mastic Asphalt mixtures

Recycled mixtures

Mechanical performance

Economic and environmental analysis

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos e metodologia	4
1.3. Organização da tese	5
2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	9
2.1. Características das misturas betuminosas	9
2.2. Misturas betuminosas não convencionais	13
2.2.1. Misturas com betume modificado	14
2.2.2. Misturas betuminosas do tipo <i>Stone Mastic Asphalt</i> (SMA)	15
2.2.3. Misturas betuminosas recicladas	18
2.3. Modificação de betume com polímeros	22
2.3.1. Modificação com plastómeros.....	25
2.3.2. Modificação com elastómeros.....	28
2.4. Modificação de betume com produtos derivados de óleo de motor.....	33
3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	41
3.1. Introdução	41
3.2. Óleo de motor usado e fundo de coluna de destilação	43
3.2.1. Viscosidade dinâmica	44
3.2.2. Propriedades térmicas	45
3.2.3. Propriedades químicas	48
3.2.4. Presença de metais pesados e outros contaminantes.....	52
3.3. Polímeros	54
3.3.1. Propriedades físicas.....	56
3.3.2. Propriedades térmicas.....	57
3.3.3. Propriedades químicas	62
3.4. Materiais inertes	65

3.4.1. Agregados	65
3.4.2. Filer	66
3.4.3. Fibras	67
3.5. Material fresado.....	68
4. DESENVOLVIMENTO DE BETUMES MODIFICADOS COM RESÍDUOS	71
4.1. Betumes modificados com produtos derivados de óleo de motor	71
4.1.1. Propriedades básicas	71
4.1.2. Propriedades reológicas.....	73
4.1.3. Propriedades térmicas.....	76
4.2. Estudo prévio da produção dos betumes modificados com resíduos	77
4.2.1. Seleção do processo de produção dos betumes modificados.....	78
4.2.2. Influência da quantidade de óleo de motor usado e polímeros nas propriedades básicas do betume	84
4.3. Seleção dos betumes modificados com resíduos mais promissores	93
4.3.1. Betumes modificados com óleo de motor usado e polímeros.....	93
4.3.2. Betumes modificados com fundo de coluna e polímeros	97
4.4. Caracterização adicional dos betumes modificados com resíduos previamente selecionados.....	103
4.4.1. Propriedades básicas	104
4.4.2. Propriedades reológicas.....	105
4.4.3. Resistência ao envelhecimento	108
4.4.4. Propriedades térmicas.....	113
5. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS COM BETUMES MODIFICADOS COM RESÍDUOS.....	115
5.1. Condições de produção e formulação das misturas betuminosas em estudo	115
5.2. Escorrimento do ligante	120
5.3. Características mecânicas das misturas com betumes modificados com resíduos	122
5.3.1. Sensibilidade à água.....	122
5.3.2. Módulo de rigidez.....	125
5.3.3. Resistência ao fendilhamento por fadiga	127

5.3.4. Resistência à deformação permanente.....	130
5.4. Características superficiais das misturas com betumes modificados com resíduos.....	134
6. DESENVOLVIMENTO DE BETUMES MODIFICADOS COM RESÍDUOS PARA MISTURAS RECICLADAS	139
6.1. Introdução	139
6.2. Betumes modificados com resíduos que se adequam à produção de misturas recicladas	139
6.3. Formulação e estudo das condições de produção das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos	141
6.4. Seleção dos betumes das misturas recicladas modificados com resíduos	146
6.4.1. Betumes modificados com derivados de óleo de motor e HDPE	147
6.4.2. Betumes modificados com derivados de óleo de motor e SBS	149
6.4.3. Betumes modificados com derivados de óleo de motor e borracha	151
6.5. Propriedades dos betumes das misturas recicladas modificados com resíduos que resultaram do processo de seleção	153
6.5.1. Propriedades básicas.....	154
6.5.2. Propriedades reológicas.....	155
6.5.3. Resistência ao envelhecimento	159
6.5.4. Propriedades térmicas	162
7. CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS RECICLADAS COM BETUMES MODIFICADOS COM RESÍDUOS.....	165
7.1. Introdução	165
7.2. Escorrimento do ligante	166
7.3. Características mecânicas das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos	167
7.3.1. Sensibilidade à água.....	167
7.3.2. Módulo de rigidez	170
7.3.3. Resistência ao fendilhamento por fadiga	171
7.3.4. Resistência à deformação permanente.....	174
7.4. Características superficiais das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos	177

8. SUSTENTABILIDADE DAS MISTURAS BETUMINOSAS ESTUDADAS	181
8.1. Considerações iniciais.....	181
8.1.1. Módulos de rigidez utilizados no dimensionamento das estruturas de pavimentos consideradas	181
8.1.2. Critérios de dimensionamento	183
8.1.3. Resultados de dimensionamento das estruturas de pavimentos consideradas	186
8.2. Análise económica.....	192
8.2.1. Custo de produção dos betumes	192
8.2.2. Custo das estruturas de pavimentos resultantes da utilização dos betumes com resíduos	196
8.3. Análise ambiental	206
8.3.1. Avaliação dos lixiviados das misturas consideradas em camadas de desgaste	206
8.3.2. Avaliação das emissões gasosas com efeito de estufa	212
9. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	225
9.1. Conclusões.....	225
9.2. Trabalhos futuros.....	234
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	237

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. Fatores e propriedades que afetam a capacidade estrutural das misturas betuminosas (adaptado de Epps <i>et al.</i> , 2003).....	11
Quadro 3.1. Compostos e grupos funcionais típicos de betumes e óleo de motor usado que podem ser identificados no ensaio FTIR (adaptado de DeDene <i>et al.</i> , 2014 e Jia <i>et al.</i> , 2014).	49
Quadro 3.2. Análise dos metais pesados e contaminantes do betume convencional, óleo de motor usado e fundo de coluna.	53
Quadro 3.3. Propriedades físicas e mecânicas dos agregados utilizados neste estudo.....	66
Quadro 3.4. Propriedades do filer calcário utilizado neste estudo.....	67
Quadro 4.1. Resultados do ensaio de termogravimetria dos betumes de controlo e dos betumes modificados com 10% de óleo de motor usado ou fundo de coluna.	76
Quadro 4.2. Temperatura mais elevada do grau PG dos betumes de controlo e betumes modificados com óleo de motor usado selecionados.....	95
Quadro 4.3. Resumo das propriedades básicas (penetração, temperatura de amolecimento, resiliência e temperaturas de produção/compactação) dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas.	104
Quadro 4.4. Temperatura mais elevada do grau PG dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas.....	106
Quadro 4.5. Resultados do ensaio de termogravimetria dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas.....	113
Quadro 5.1. Resultados do ensaio de sensibilidade à água das misturas de controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.....	124
Quadro 5.2. Parâmetros obtidos no ensaio de fendilhamento por fadiga das misturas de controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.	129
Quadro 5.3. Parâmetros obtidos no ensaio de deformação permanente das misturas de controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.	132
Quadro 6.1. Caracterização básica do betume de controlo e dos betumes modificados com resíduos que se adequam à produção de misturas recicladas.....	140
Quadro 6.2. Resumo das propriedades básicas (penetração, temperatura de amolecimento, resiliência e temperaturas de produção/compactação) dos betumes das misturas recicladas selecionados.....	154

Quadro 6.3. Temperatura mais elevada do grau PG dos betumes das misturas recicladas.....	157
Quadro 6.4. Resultados do ensaio de termogravimetria dos betumes das misturas recicladas.	163
Quadro 7.1. Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.	168
Quadro 7.2. Parâmetros obtidos no ensaio de fendilhamento por fadiga da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.	173
Quadro 7.3. Parâmetros obtidos no ensaio de deformação permanente da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.	176
Quadro 8.1. Módulos de rigidez considerados para as misturas de desgaste (BD) e de ligação/base (MB) sem incorporação de material fresado.	182
Quadro 8.2. Módulos de rigidez considerados para as misturas de desgaste (BD) e de ligação/base (MB) recicladas.	183
Quadro 8.3. Quantidade de metais pesados nos eluatos das misturas de controlo e das misturas com óleo de motor usado e polímeros.	208
Quadro 8.4. Quantidade de metais pesados nos eluatos das misturas de controlo e das misturas com fundo de coluna e polímeros.	209
Quadro 8.5. Quantidade de metais pesados nos eluatos do material fresado.	210
Quadro 8.6. Quantidade de metais pesados nos eluatos da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com óleo de motor e polímeros.	210
Quadro 8.7. Quantidade de metais pesados nos eluatos da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com fundo de coluna e polímeros.	211
Quadro 8.8. Valores de kg CO ₂ -equiv./kg para a produção dos diferentes materiais.	213
Quadro 8.9. Distâncias dos materiais até à central e da central ao local de obra, em km.	214
Quadro 8.10. Valores de kg CO ₂ -equiv./kg resultantes da produção das diferentes misturas.	215

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Organização da tese.....	5
Figura 2.1. Limites especificados e curvas granulométricas já utilizadas em trabalhos anteriores para misturas do tipo SMA 14 (adaptado de Woodward, 2016 e Miranda, 2013).	17
Figura 2.2. Representação do a) monómero de etileno e da b) molécula de polietileno (adaptado de Crawford, 1992).....	26
Figura 2.3. Representação da estrutura molecular do polietileno de alta densidade (adaptado de Osswald e Menges, 1996).....	27
Figura 2.4. Polietileno de alta densidade reciclado: (a) origem e (b) após moagem.	28
Figura 2.5. Representação da estrutura molecular do estireno-butadieno-estireno (adaptado de Harper, 1975).	30
Figura 2.6. Estireno-Butadieno-Estireno.	30
Figura 2.7. Borracha de pneu usado: (a) origem e (b) após processo criogénico, respetivamente.	33
Figura 3.1. Comparação das viscosidades dos diferentes óleos em análise e do betume B35/50.	44
Figura 3.2. Curvas termogravimétricas do óleo de motor usado, fundo de coluna e betume B35/50.	47
Figura 3.3. Espectros FTIR do (a) betume B35/50 e do (b) óleo de motor reciclado.	50
Figura 3.4. Espectros FTIR do óleo de motor usado de (a) veículos ligeiros e de (b) veículos pesados.	51
Figura 3.5. Espectros FTIR do (a) óleo de motor usado e do (b) fundo de coluna.	51
Figura 3.6. Curvas DSC dos polímeros HDPE, SBS e CR utilizados neste estudo.....	58
Figura 3.7. Curva termogravimétrica do polímero HDPE.	59
Figura 3.8. Curva termogravimétrica do polímero SBS.....	60
Figura 3.9. Curva termogravimétrica do polímero CR.....	61
Figura 3.10. Espectro FTIR do polímero HDPE.	63
Figura 3.11. Espectro FTIR do polímero SBS.....	63
Figura 3.12. Espectro FTIR do polímero CR.....	64
Figura 3.13. Curva granulométrica dos agregados em estudo.....	65
Figura 3.14. Fibras acrílicas utilizadas neste estudo.	67

Figura 3.15. Curva granulométrica da fração fina e grossa do material fresado utilizado.	69
Figura 4.1. Resultados de (a) penetração, temperatura de amolecimento e (b) viscosidade dinâmica dos betumes de controlo e dos betumes modificados com 10% de óleo de motor usado ou fundo de coluna.	72
Figura 4.2. Curvas mestras ($T_{ref}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$) do (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase dos betumes de controlo e dos betumes modificados com 10% de óleo de motor usado ou fundo de coluna.	74
Figura 4.3. Parâmetro de deformação não recuperada (J_{nr}) dos betumes de controlo e dos betumes modificados com 10% de óleo de motor usado ou fundo de coluna.	75
Figura 4.4. Microscopia de fluorescência dos betumes com 10% de óleo de motor usado e 5% de HDPE produzidos com (a) misturador de baixo corte e (b) misturador de alto corte.	80
Figura 4.5. Microscopia de fluorescência dos betumes com 10% de óleo de motor usado e 5% de SBS produzidos com (a) misturador de baixo corte e (b) misturador de alto corte.	80
Figura 4.6. Microscopia de fluorescência dos betumes com 10% de óleo de motor usado e 5% de HDPE produzidos com (a) procedimento 1 e (b) procedimento 2.	84
Figura 4.7. Microscopia de fluorescência dos betumes com 10% de óleo de motor usado e 5% de SBS produzidos com (a) procedimento 1 e (b) procedimento 2.	84
Figura 4.8. Tipo e percentagens dos materiais usados para a modificação do betume convencional.	86
Figura 4.9. Influência da variação das percentagens de óleo de motor usado e HDPE nas seguintes propriedades: (a) penetração (0,1 mm); (b) temperatura de amolecimento ($^{\circ}\text{C}$); (c) resiliência (%).	87
Figura 4.10. Viscosidade dinâmica dos betumes modificados com óleo de motor usado e HDPE.	88
Figura 4.11. Influência da variação das percentagens de óleo de motor usado e SBS nas seguintes propriedades: (a) penetração (0,1 mm); (b) temperatura de amolecimento ($^{\circ}\text{C}$); (c) resiliência (%).	89
Figura 4.12. Viscosidade dinâmica dos betumes modificados com óleo de motor usado e SBS.	90
Figura 4.13. Influência da variação das percentagens de óleo de motor usado e CR nas seguintes propriedades: (a) penetração (0,1 mm); (b) temperatura de amolecimento ($^{\circ}\text{C}$); (c) resiliência (%).	91
Figura 4.14. Viscosidade dinâmica dos betumes modificados com óleo de motor usado e CR.	92

Figura 4.15. Curvas mestre ($T_{ref}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$) do (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase dos betumes de controlo e betumes modificados com óleo de motor usado selecionados.	94
Figura 4.16. Parâmetro de deformação não recuperada (J_{nr}) dos betumes de controlo e betumes modificados com óleo de motor usado selecionados.	96
Figura 4.17. Resultados de (a) penetração e (b) temperatura de amolecimento dos betumes modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 6% de HDPE.	98
Figura 4.18. Viscosidade dinâmica dos betumes modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 6% de HDPE.	99
Figura 4.19. Resultados de (a) penetração e (b) temperatura de amolecimento dos betumes modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 5% de SBS.	100
Figura 4.20. Viscosidade dinâmica dos betumes modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 5% de SBS.	101
Figura 4.21. Resultados de (a) penetração e (b) temperatura de amolecimento dos betumes modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 20% de CR.	102
Figura 4.22. Viscosidade dinâmica dos betumes modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 20% de CR.	103
Figura 4.23. Curvas mestras ($T_{ref}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$) do (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas.	105
Figura 4.24. Parâmetro de deformação não recuperada (J_{nr}) dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas.	107
Figura 4.25. Resultados de envelhecimento (penetração conservada, aumento da temperatura de amolecimento e perda de massa) dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas.	109
Figura 4.26. Índice de carbonilo dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas antes e após RTFOT.	112
Figura 4.27. Índice de sulfóxido dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas antes e após RTFOT.	113
Figura 5.1. Limites especificados de uma mistura SMA 14 e curva granulométrica das misturas de controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.	116
Figura 5.2. Cesto usado no ensaio de escorrimento e exemplo da escorrência de betume observada para a percentagem de betume de 7,2%.	117

Figura 5.3. Resultados do estudo <i>Marshall</i> da mistura SMA-PMB45/80.	118
Figura 5.4. Resultados de escoamento das misturas de controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.....	121
Figura 5.5. Curvas mestras do (a) módulo de rigidez e (b) ângulo de fase ($T_{ref}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$) das misturas de controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.	126
Figura 5.6. Resultados do ensaio fendilhamento por fadiga em flexão em quatro pontos das misturas de controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.	127
Figura 5.7. Resultados do ensaio de deformação permanente das misturas de referência e das misturas com betumes modificados com resíduos.....	131
Figura 5.8. Representação 3D das amostras das misturas SMA-PMB45/80 e SMA-BF15H6, respetivamente, após ensaio de deformação permanente.....	133
Figura 5.9. Resultados da profundidade média do perfil (MPD) das misturas de controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.....	135
Figura 5.10. Resultados do pêndulo Britânico das misturas controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.....	136
Figura 6.1. Limites especificados de uma mistura SMA 14 e curva granulométrica da mistura de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.	142
Figura 6.2. Resultados de (a) penetração e (b) temperatura de amolecimento dos betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor e SBS a utilizar para formulação <i>Marshall</i>	143
Figura 6.3. Resultados do estudo de formulação <i>Marshall</i> da mistura reciclada SMA-RB015S5.	146
Figura 6.4. Resultados de (a) penetração e (b) temperatura de amolecimento dos betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 6% de HDPE.	148
Figura 6.5. Viscosidade dinâmica dos betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 6% de HDPE.	148
Figura 6.6. Resultados de (a) penetração e (b) temperatura de amolecimento dos betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 5% de SBS.	149
Figura 6.7. Viscosidade dinâmica dos betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 5% de SBS.....	150

Figura 6.8. Resultados de (a) penetração e (b) temperatura de amolecimento dos betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 20% de CR.....	151
Figura 6.9. Viscosidade dinâmica dos betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 20% de CR.....	152
Figura 6.10. Curvas mestras ($T_{ref}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$) do (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase dos betumes das misturas recicladas.	156
Figura 6.11. Parâmetro de deformação não recuperada (J_{nr}) dos betumes das misturas recicladas.	158
Figura 6.12. Resultados de envelhecimento (penetração conservada, aumento da temperatura de amolecimento e perda de massa) dos betumes das misturas recicladas.	159
Figura 6.13. Índice de carbonilo dos betumes das misturas recicladas antes e após RTFOT.	161
Figura 6.14. Índice de sulfóxido dos betumes das misturas recicladas antes e após RTFOT.	162
Figura 7.1. Resultados de escorrimento do betume da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.	167
Figura 7.2. Curvas mestras do (a) módulo de rigidez e (b) ângulo de fase ($T_{ref}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$) da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.	170
Figura 7.3. Resultados do ensaio de fendilhamento por fadiga em flexão em quatro pontos da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.	172
Figura 7.4. Resultados do ensaio de deformação permanente da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.	175
Figura 7.5. Representação 3D das amostras das misturas SMA-RB015H6 e SMA-RBF22,5R20, respetivamente, após ensaio de deformação permanente.	175
Figura 7.6. Resultados da profundidade média do perfil (MPD) da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.	178
Figura 7.7. Resultados do pêndulo Britânico da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.	179
Figura 8.1. Lei de fadiga da <i>Shell</i> aplicada à mistura de controlo e leis da <i>Shell</i> ajustadas para as misturas com betumes modificados com resíduos sem incorporação de material fresado.	185

Figura 8.2. Lei de fadiga da <i>Shell</i> aplicada à mistura reciclada de controlo e leis da <i>Shell</i> ajustadas para as misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.....	186
Figura 8.3. Estruturas dos pavimentos com misturas sem material fresado, em função do betume utilizado, dimensionadas para a classe de tráfego T1.	187
Figura 8.4. Estruturas dos pavimentos com misturas sem material fresado, em função do betume utilizado, dimensionadas para a classe de tráfego T3.	188
Figura 8.5. Estruturas dos pavimentos com misturas recicladas, em função do betume utilizado, dimensionadas para a classe de tráfego T1.	190
Figura 8.6. Estruturas dos pavimentos com misturas sem material fresado, em função do betume utilizado, dimensionadas para a classe de tráfego T3.	191
Figura 8.7. Custo médio dos betumes de controlo e dos betumes modificados com resíduos para misturas sem material fresado.	194
Figura 8.8. Custo médio do betume de controlo e dos betumes modificados com resíduos para misturas recicladas.	195
Figura 8.9. Fluxograma da análise económica das misturas betuminosas sem material fresado em estudo.	197
Figura 8.10. Fluxograma da análise económica das misturas recicladas em estudo.	199
Figura 8.11. Custo das misturas betuminosas sem material fresado, em função do betume utilizado, para estruturas “equivalentes” dimensionadas para a classe de tráfego T1.	200
Figura 8.12. Custo das misturas betuminosas sem material fresado, em função do betume utilizado, para estruturas “equivalentes” dimensionadas para a classe de tráfego T3.	201
Figura 8.13. Custo da mistura de controlo e das misturas recicladas, em função do betume utilizado, para estruturas “equivalentes” dimensionadas para a classe de tráfego T1.	203
Figura 8.14. Custo da mistura de controlo e das misturas recicladas, em função do betume utilizado, para estruturas “equivalentes” dimensionadas para a classe de tráfego T3 ...	204
Figura 8.15. Processo de obtenção do eluato para análise de metais pesados.	207
Figura 8.16. Emissões de CO ₂ -equivalente das misturas betuminosas do tipo SMA tendo em conta o tipo de betume utilizado para os diferentes cenários.	216

Figura 8.17. Emissões de CO ₂ -equivalente da mistura de controlo sem material fresado e das misturas recicladas do tipo SMA tendo em conta o betume utilizado para os diferentes cenários.....	218
Figura 8.18. Emissões finais de CO ₂ -equivalente das misturas sem material fresado, em função do betume utilizado para as classes de tráfego (a) T1 e (b) T3.....	220
Figura 8.19. Emissões finais de CO ₂ -equivalente da mistura de controlo sem material fresado e das misturas recicladas, em função do betume utilizado para as classes de tráfego (a) T1 e (b) T3.	222

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

A preocupação ambiental com a valorização de resíduos e conservação dos recursos naturais, aliada à diminuição gradual das reservas de petróleo e ao seu elevado preço, têm motivado a realização de estudos recentes sobre novos ligantes que possam substituir o betume parcialmente ou na sua totalidade (Metwally e Williams, 2010) e para a reciclagem de misturas betuminosas envelhecidas (Dony *et al.*, 2013, Lopez *et al.*, 2011). Nesse sentido, as misturas que utilizem betumes modificados com resíduos na sua constituição sem condicionar o seu desempenho e custo, e ao mesmo tempo sejam seguras para as pessoas e o ambiente, poderão ser consideradas misturas sustentáveis.

Todavia, estes ligantes inovadores que pretendem diminuir ou eliminar a utilização de betume ainda apresentam tradicionalmente um comportamento inferior por comparação com o betume convencional (Fuentes-Audén *et al.*, 2007, Metwally e Williams, 2010). No entanto, é possível modificar os betumes convencionais com alguns materiais (se possível, reciclados) que permitam diminuir a utilização de betume novo e melhorar significativamente as características das misturas betuminosas (Fuentes-Audén *et al.*, 2008, Zargar *et al.*, 2012).

De facto, um dos principais modificadores usados nas misturas betuminosas são os polímeros (García-Morales *et al.*, 2006), sendo possível a utilização de resíduos plásticos ou até mesmo de borracha de pneus usados para esse fim. Salienta-se que na Europa, dos 47 milhões de toneladas de plásticos usados pelos diferentes setores industriais, 10,2 milhões de toneladas de plásticos acabam em aterro, sem qualquer valorização e/ou recuperação (PlasticsEurope *et al.*, 2012). Desta forma, é possível promover a sua reutilização, aplicando-os na modificação de betumes, o que apresenta vantagens, quer a nível ambiental (diminuição de resíduos), quer no comportamento do pavimento (pode diminuir as deformações permanentes, fendilhamento e suscetibilidade térmica) (Costa *et al.*, 2013a, Yildirim, 2007).

No caso da borracha de pneus usados, estima-se que na Europa, em 2013, dos 2,7 milhões de toneladas de pneus em fim de vida, 96% foram recuperados, reciclados e utilizados para valorização energética. Contudo, 134 mil toneladas de pneus em fim de vida foram colocadas em aterro (ETRMA, 2015). Em Portugal, de acordo com o mesmo relatório, das 66 mil toneladas de pneus em fim de vida foram

recicladas, recuperadas e utilizadas para valorização energética a totalidade dos pneus em fim de vida, ou seja, Portugal exibe uma taxa de recuperação de 100%. Importa ainda referir que 27 mil toneladas são usadas para valorização energética e apenas 1000 toneladas são recicladas para utilização na área da Engenharia Civil. A utilização da borracha de pneus nos betumes poderá reduzir a percentagem de valorização energética (forma de recuperação menos sustentável), poupando energia e recursos naturais e permitindo obter misturas mais resistentes à deformação permanente (devido à elevada viscosidade dos betumes com borracha), ao fendilhamento por fadiga e à reflexão de fendas, bem como melhorando a sua suscetibilidade térmica (Zhang e Hu, 2015).

Outra forma de reduzir a quantidade de betume virgem prende-se com a reutilização do betume já existente no material fresado ou *Reclaimed Asphalt Pavement*, na terminologia anglo-saxónica (RAP) proveniente de misturas degradadas, ao produzir misturas recicladas. Contudo, devido ao envelhecimento a que esse betume é sujeito durante a vida do pavimento, é necessário adicionar rejuvenescedores para conferir propriedades mecânicas típicas de um betume convencional (Dony *et al.*, 2013, Lopez *et al.*, 2011, Romera *et al.*, 2006, Silva *et al.*, 2012). O objetivo dos rejuvenescedores é conferir as propriedades iniciais a um betume envelhecido, ao reestabelecer a relação asfaltenos-maltenos (García *et al.*, 2011). Vários estudos referem alguns exemplos de possíveis rejuvenescedores, tais como os betumes de elevada penetração, os óleos vegetais (Dony *et al.*, 2013), os óleos de diluição (Karlsson e Isacsson, 2006) e o óleo de motor usado (Romera *et al.*, 2006, Silva *et al.*, 2012).

O óleo de motor usado é um resíduo utilizado para rejuvenescimento ou prevenção do envelhecimento do betume, visto que dilui os asfaltenos provenientes do envelhecimento do betume, adicionando-lhe maltenos (Lesueur, 2009). A adição de óleo usado reduz a temperatura de mistura e compactação (Romera *et al.*, 2006) e a sua reutilização apresenta benefícios a nível ambiental e económico. Na Europa em 2006 o consumo de óleo de motor era de 5,8 milhões de toneladas por ano, sendo que cerca de 50% (cerca de 3 milhões de toneladas) acabam como resíduo (European Commission, 2016). Em Portugal, a gestão de óleos usados é realizada pela Sociedade de Gestão Integrada de Óleos Lubrificantes Usados (SOGILUB) cujo principal objetivo é a recolha, transporte para unidades de armazenamento, ou diretamente para o tratamento e a valorização (regeneração, reciclagem ou valorização energética) dos óleos usados.

Em 2016 foram recolhidas 25707 toneladas de óleos usados e enviados para tratamento, onde se removem a água e sedimentos da sua composição. Após o tratamento foram valorizadas 5281 toneladas

através da reciclagem (que de acordo com o Decreto-Lei 73/2011 de 17 de Junho é o reprocessamento de materiais orgânicos, através do qual os materiais constituintes dos resíduos são novamente transformados em produtos, materiais ou substâncias para o seu fim original ou para outros fins) e 16385 toneladas através de regeneração (operação de reciclagem que permite produzir óleos de base mediante a refinação de óleos usados, designadamente mediante a remoção dos contaminantes, produtos de oxidação e aditivos que os referidos óleos contenham). Nenhuma quantidade de óleo usado foi encaminhada para valorização energética (Sogilub, 2016). No entanto, a reutilização destes óleos na pavimentação também pode ser uma solução vantajosa, nomeadamente, pela valorização de óleos usados que não cumpram os requisitos (e por isso não sejam incluídos no processo de tratamento), o que permitiria a sua reciclagem sem ser necessário nenhum tipo de tratamento.

Outro resíduo utilizado como modificador de betumes e como óleo de diluição, nomeadamente, nos Estados Unidos da América e no Canadá é o fundo de coluna de destilação. O fundo de coluna (como é vulgarmente designado) é o resíduo resultante do processo de regeneração do óleo de motor usado, cujo destino era a queima para valorização energética. Recentemente, este resíduo começou a ser utilizado pela indústria da pavimentação rodoviária devido às exigências governamentais que proibiram a sua queima devido a preocupações ambientais (Paliukaite *et al.*, 2016). De acordo com Mooney (2015) estima-se que a produção nos Estados Unidos de fundo de coluna seja de aproximadamente 160 mil toneladas anualmente.

As potenciais melhorias provocadas pela inclusão de resíduos poliméricos e óleo usado ou fundo de coluna no betume, assim como a necessidade de reduzir a quantidade de betume utilizado nas misturas betuminosas, motivaram a realização deste estudo. Uma vez que o óleo de motor e o fundo de coluna têm a mesma proveniência do betume (petróleo), a sua compatibilidade deverá estar garantida. Neste trabalho optou-se por utilizar polímeros de tipologias diferentes, nomeadamente, um plastómero e dois elastómeros, para verificar as diferentes modificações que estes provocam quando adicionados ao óleo de motor usado/betume ou fundo de coluna/betume.

Estes betumes modificados inovadores a desenvolver devem possuir características adequadas para aplicação em misturas betuminosas, nomeadamente características iguais ou superiores a betumes comerciais, independentemente da utilização a que se destinam (misturas sem material fresado e misturas recicladas).

1.2. Objetivos e metodologia

Este trabalho tem como objetivo desenvolver betumes inovadores que possam ser um produto competitivo para a indústria da pavimentação pelo seu custo e desempenho, e que maximizem a utilização de resíduos. Estes betumes modificados, e consequentes misturas, deverão minimizar o uso de recursos naturais (agregados e betume), procurando reciclar e reutilizar material betuminoso (especialmente o material fresado) e resíduos (polímeros, óleo de motor usado e fundo de coluna), adequando-os à construção e reabilitação de estradas.

Assim, neste trabalho pretende-se maximizar a substituição de betume por óleo usado ou fundo de coluna, em misturas convencionais e recicladas, adicionando resíduos poliméricos para melhorar a estabilidade dos betumes modificados. Para garantir que o comportamento destes betumes é adequado ao seu uso, é necessário compará-los com betumes comerciais convencionais e modificados. Deste modo, será realizada uma intensa caracterização laboratorial dos resíduos utilizados, do material betuminoso a reciclar e, em especial, dos novos betumes desenvolvidos, recorrendo a ensaios básicos e avançados para conhecer o seu desempenho, estabilidade ao armazenamento e resistência ao envelhecimento, nomeadamente através de ensaios reológicos, físico-químicos, térmicos e microscópicos.

Além disso, é crucial avaliar o desempenho destes betumes modificados quando aplicados em misturas betuminosas novas e recicladas, por comparação com misturas produzidas com betumes comerciais. Esse desempenho será avaliado através de ensaios de resistência à fadiga e deformação permanente, módulo de rigidez e sensibilidade à água. Uma vez que o efeito da constituição betume no comportamento das misturas será mais perceptível em misturas betuminosas com uma percentagem de betume superior, optou-se por estudar neste trabalho as misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA).

Por serem misturas tradicionalmente aplicadas em camadas de desgaste, também se considerou importante avaliar as suas características superficiais. Para além disso, de modo a garantir a inexistência de problemas ambientais, as misturas convencionais e recicladas deverão ser avaliadas quanto à eventual toxicidade dos seus lixiviados e quanto às emissões de dióxido de carbono resultantes da sua produção. No final pretende-se ainda proceder a uma análise económica das diferentes soluções, quer ao nível do custo dos próprios betumes modificados, quer ao nível do custo das misturas.

Em suma, este trabalho pretende avaliar a possibilidade de desenvolvimento de soluções mais sustentáveis para a indústria da pavimentação, que alie o desempenho técnico, a viabilidade económica e os benefícios ambientais resultantes da utilização de resíduos e material reciclado na substituição dos materiais usados em misturas betuminosas, e em especial de uma parte do betume.

1.3. Organização da tese

De modo a dar resposta aos objetivos anteriormente mencionados, bem como a proceder a um enquadramento do tema e motivação do estudo, esta tese encontra-se dividida em 9 capítulos. Nos três primeiros capítulos há uma forte componente de pesquisa bibliográfica, seguindo-se até ao Capítulo 7 a componente experimental do trabalho e no Capítulo 8 uma combinação da parte experimental (ainda que mais reduzida) com ferramentas analíticas usadas para a análise económica e das emissões de dióxido de carbono. Por último (Capítulo 9), apresentam-se as conclusões gerais do trabalho e os trabalhos futuros.

A organização da tese pode ser observada na Figura 1.1 e a descrição dos capítulos será apresentada em seguida.

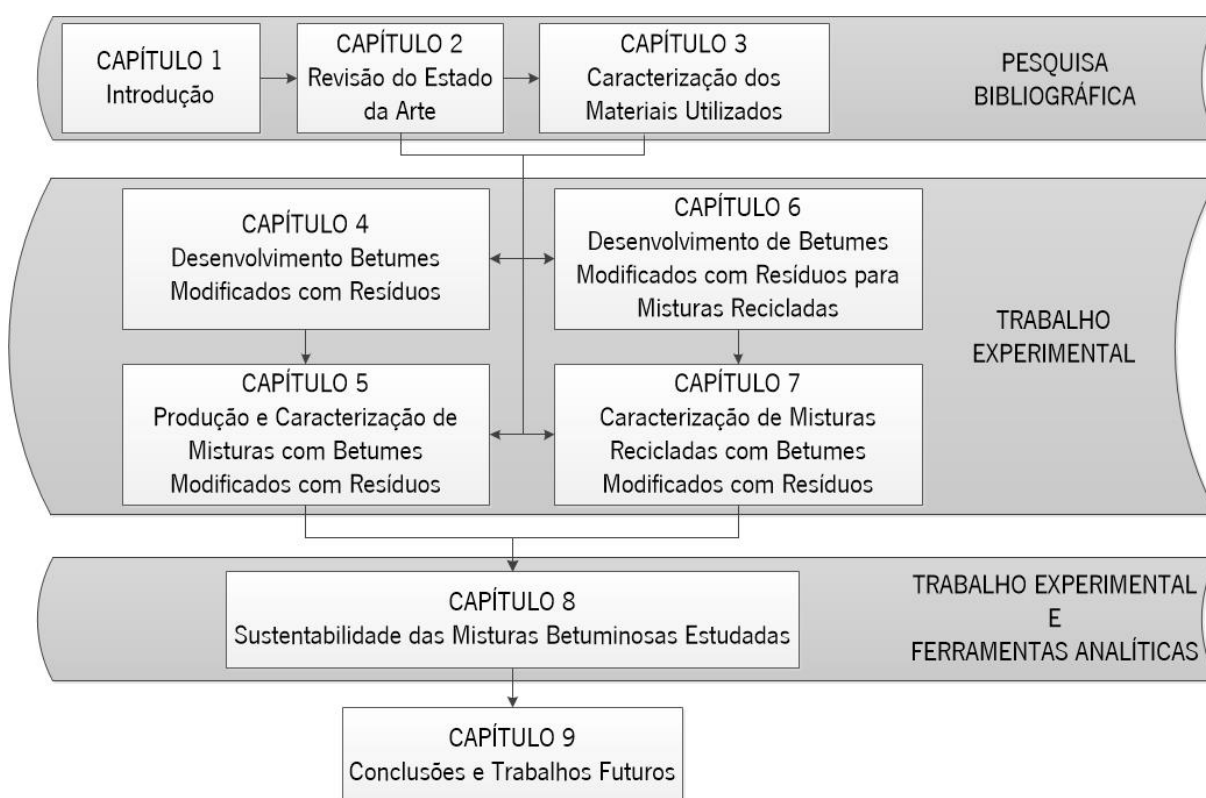


Figura 1.1. Organização da tese.

O Capítulo 1, denominado Introdução, compreende o enquadramento temático, os principais objetivos e metodologias adotadas neste estudo, assim como, a organização/estruturação da tese.

Por sua vez, no Capítulo 2 procedeu-se à revisão literária do tema, nomeadamente quais os principais problemas que surgem nas misturas betuminosas e que levam à necessidade de utilização de modificadores e rejuvenescedores. Para além disso, neste capítulo são também abordados os principais modificadores utilizados, as suas principais características, vantagens e lacunas. Por último, ainda são referidos outros aditivos derivados do óleo de motor usado, quer para regeneração, quer para modificação dos betumes, bem como, as suas características, mais-valias e limitações, dando o mote para o estudo desenvolvido.

No Capítulo 3 realizou-se a caracterização dos diferentes materiais utilizados neste estudo, nomeadamente óleo de motor usado e fundo de coluna, polímeros (estireno-butadieno-estireno, resíduos de polietileno de alta densidade e borracha de pneus usados), agregados, filer, fibras e material fresado. No caso do óleo de motor usado e fundo de coluna realizou-se a caracterização a nível térmico (ensaio de viscosidade dinâmica e termogravimetria), químico (ensaio espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier) e de toxicidade (ensaio de espectroscopia de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente). Por sua vez, os polímeros foram caracterizados quanto às suas propriedades físicas (dimensão e densidade), térmicas (ensaio de calorimetria de varrimento diferencial e termogravimetria) e químicas (ensaio de espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier). Os agregados e o filer foram caracterizados ao nível da sua origem, frações e propriedades contempladas na ficha técnica do produto, enquanto nas fibras caracterizou-se a sua natureza, comprimento, diâmetro nominal e densidade. Por último, o material fresado foi avaliado quanto à sua proveniência, granulometria, percentagem de betume e, o betume envelhecido nele contido foi caracterizado através de ensaios de caracterização básica (penetração a 25 °C, temperatura de amolecimento e viscosidade dinâmica).

No Capítulo 4 avaliou-se inicialmente o efeito da adição do óleo de motor ou fundo de coluna isoladamente. Em seguida, analisou-se qual o melhor método de produção dos betumes modificados com o substituto parcial e os diferentes polímeros, bem como a influência da variação, quer da quantidade de óleo de motor usado, quer da quantidade dos diferentes polímeros nas propriedades básicas dos betumes. Neste capítulo também se procedeu à seleção dos betumes modificados com resíduos com as características mais promissoras, tendo em conta a sua caracterização básica

(penetração a 25 °C, temperatura de amolecimento e viscosidade dinâmica) e avançada (ensaio reológico para determinação do módulo complexo, ângulo de fase, temperatura mais elevada do grau PG (*Performance Grade*) e para determinação da fluência e relaxamento). Os betumes selecionados para a produção das misturas betuminosas (com base nos resultados desses ensaios) foram ainda avaliados através das suas propriedades básicas, reológicas, térmicas (termogravimetria) e de resistência ao envelhecimento (*Rolling Thin-Film Oven Test* e ensaio espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier).

No quinto capítulo refere-se o método de produção das misturas betuminosas e apresenta-se a formulação *Marshall*. Para além disso, avaliou-se o desempenho das misturas ao nível do escorrimento do ligante, da sensibilidade à água, do módulo de rigidez, da resistência ao fendilhamento por fadiga e à deformação permanente, bem como as características superficiais (macrotextura e a resistência ao deslizamento).

O Capítulo 6 inicia-se com a formulação *Marshall* das misturas recicladas, ensaio essencial para determinação da percentagem de betume das misturas e que condiciona a percentagem de betume modificado com resíduos a adicionar, em função da percentagem de betume envelhecido presente no material fresado. Nesse capítulo também se apresenta a caracterização dos betumes resultantes da incorporação dos derivados de óleo usado e dos três polímeros em estudo, bem como a seleção dos betumes mais promissores e a sua caracterização quanto às propriedades básicas, reológicas, térmicas e de resistência ao envelhecimento, já mencionadas no Capítulo 4.

No Capítulo 7 explicou-se o método de produção das misturas recicladas, caracterizando o desempenho das mesmas através dos ensaios referidos na descrição do Capítulo 5.

O Capítulo 8 contempla a avaliação económica das diferentes misturas aplicadas no dimensionamento de diferentes estruturas de pavimentos, tendo em conta os resultados de desempenho mecânico obtidos nos capítulos anteriores e o custo dos betumes modificados comparativamente aos betumes comerciais em análise. Adicionalmente, apresentou-se a avaliação dos lixiviados provenientes das diferentes misturas avaliadas neste estudo, bem como as emissões de CO₂-equivalente das mesmas.

No último capítulo apresentaram-se as principais conclusões obtidas neste estudo e algumas sugestões de pontos a analisar que poderão ser objeto de futuros estudos.

2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1. Características das misturas betuminosas

As infraestruturas rodoviárias são fundamentais para o desenvolvimento de um país, uma vez que garantem uma adequada acessibilidade a qualquer parte do território (Branco *et al.*, 2006). Tendo em conta a sua importância e, de acordo com a EAPA (2012), é essencial incitar uma correta produção, aplicação e utilização das misturas betuminosas de forma a construir e preservar a sustentabilidade da infraestrutura rodoviária Europeia.

Os dados da EAPA (2015), *European Asphalt Pavement Association*, entre o período de 2008 a 2015, referem que a produção de misturas betuminosas a quente e temperadas variou entre o valor mínimo de 263,7 milhões de toneladas (referente ao ano de 2014) e o valor máximo de 338,0 milhões de toneladas no ano de 2008, no continente Europeu. Por sua vez, nos Estados Unidos da América durante o mesmo período temporal, os valores de produção de misturas betuminosas a quente e temperadas apresentaram um valor mínimo de 318,1 milhões de toneladas (no ano de 2013) e um valor máximo de 440 milhões de toneladas (relativo ao ano de 2008). O país Europeu com maior produção de misturas betuminosas a quente e temperadas é a Alemanha, com 39 milhões de toneladas. Em Portugal estima-se uma produção de cerca de 6,4 milhões de toneladas referentes ao ano de 2015. Assim, as elevadas quantidades de misturas betuminosas que são produzidas em todo o mundo justificam que se continue a estudar novas soluções mais sustentáveis para sua aplicação, tal como se propõe neste trabalho.

De acordo com Branco *et al.* (2006), devido à elevada utilização em praticamente todo o mundo, as misturas betuminosas são o material mais utilizado na realização das camadas superiores dos pavimentos rodoviários, sendo constituídas por materiais granulares e por um ligante betuminoso.

Os materiais granulares (agregados), que formam aproximadamente 90% a 95% do peso da mistura betuminosa, têm como principal função a criação de um esqueleto pétreo que resista às ações provocadas pelo tráfego. Quanto ao ligante betuminoso, existem diferentes materiais que mostram aptidão para a utilização na pavimentação rodoviária. Todavia, os produtos derivados da destilação do petróleo bruto (betumes asfálticos) são os mais usados. Estes exibem características termoplásticas e apresentam à temperatura ambiente elevada viscosidade. No entanto, estes ligantes também podem ser obtidos em depósitos naturais ou em rochas asfálticas, tal como refere Widyatmoko e Elliott (2008).

Segundo Lesueur (2009) e Widyatmoko e Elliott (2008), o betume é um material aderente e impermeável proveniente do petróleo, parcialmente ou completamente solúvel em tolueno e bastante viscoso ou praticamente sólido à temperatura ambiente. Para além da definição supracitada, o betume pode ser definido reologicamente como um sistema coloidal, onde os compostos com maior peso molecular, os asfaltenos, estão dispersos nos compostos com baixo peso molecular, os maltenos (Fuentes-Audén *et al.*, 2008, Widyatmoko e Elliott, 2008).

Os maltenos podem ser divididos em saturados, aromáticos e resinas. Os saturados constituem cerca de 5 % a 15 % do peso do betume e apresentam-se como um líquido incolor ou levemente colorido e solúvel em heptano normal. Os aromáticos são a fração mais abundante dos constituintes do betume e define-se como um líquido viscoso cuja cor varia de amarela a vermelha à temperatura ambiente. Por último existem as resinas que à temperatura ambiente apresentam-se num estado sólido polarizado de cor preta, sendo um componente bastante importante na estabilidade do betume, uma vez que funcionam como estabilizador dos asfaltenos (Lesueur, 2009).

Importa ainda salientar que o betume é um material viscoelástico, ou seja, parte do seu comportamento é elástico e outra parte é viscoso. Deste modo, após aplicação de uma carga, parte da deformação é recuperada (comportamento elástico) e outra não é recuperável tornando-se numa deformação permanente (comportamento viscoso) (Pavement Interactive, 2011).

O comportamento mecânico das misturas betuminosas depende assim das propriedades dos seus constituintes, nomeadamente agregados, betume e aditivos (caso se utilizem) e das suas respetivas proporções (Peralta, 2013).

De modo a garantir um comportamento satisfatório, as misturas betuminosas devem apresentar capacidade de distribuir as cargas, estabilidade para resistir à deformação permanente, resistência ao fendilhamento, bem como resistência à ação da água e a ciclos de gelo/degelo (Epps *et al.*, 2003). Os mesmos autores referem ainda que existem diversos fatores e propriedades associadas que podem afetar a capacidade estrutural exigida às misturas betuminosas (Quadro 2.1).

Branco *et al.* (2006) e Roberts *et al.* (1991) referem também que as misturas betuminosas devem garantir determinadas características, tais como: i) estabilidade; ii) durabilidade; iii) flexibilidade; iv)

resistência à fadiga; v) impermeabilidade (com exceção das misturas drenantes); vi) trabalhabilidade; e, vii) aderência.

Quadro 2.1. Fatores e propriedades que afetam a capacidade estrutural das misturas betuminosas (adaptado de Epps *et al.*, 2003).

Fatores	Propriedades
Características do betume	Reológicas
Características dos agregados	Rigidez
Características de envelhecimento	Deformação Permanente
Aditivos	Fendilhamento
Temperatura	
Histórico de carregamento	
Estado de tensão	
Método de compactação	

A estabilidade de uma mistura betuminosa refere-se à resistência às cargas que atuam durante o seu tempo de serviço, com pequenas deformações. Segundo Hınıslioğlu e Açar (2004) e Roberts *et al.* (1991), a estabilidade é a capacidade da mistura resistir às deformações permanentes, críticas quando a temperatura é elevada devido à redução de viscosidade do betume e, como tal, as cargas têm que ser suportadas pelos agregados. Esta característica depende fundamentalmente do atrito interno dos materiais (rugosidade e área de contacto das partículas) e da coesão (que depende da ligação entre o betume e os agregados) (Branco *et al.*, 2006).

No que diz respeito à durabilidade, esta define-se pela resistência à desagregação das misturas quando sujeitas às ações do tráfego. A desagregação é provocada pela volatilização das frações leves do betume (maltenos) que envelhecem o betume tornando-o extremamente rígido e/ou pela ação do gelo/degelo (Branco *et al.*, 2006). Roberts *et al.* (1991) mencionam que a mistura betuminosa deve conter uma quantidade de betume que permita envolver através de uma fina camada todos os agregados para proteger duma forma mais eficaz os agregados da ação negativa da água, evitando a perda de coesão ou aderência.

A flexibilidade, por sua vez, é a capacidade da mistura se adaptar progressivamente aos movimentos (assentamentos), quer do seu suporte, quer de certas zonas do pavimento sujeitas à ação do tráfego. A

mistura tem que ser flexível o suficiente para que não fendilhe quando sujeita a estes movimentos. A passagem contínua do tráfego origina extensões de tração nas camadas ligadas que podem levar ao seu fendilhamento e, conseqüentemente, a uma menor resistência às solicitações (Branco *et al.*, 2006). Desde modo, segundo Roberts *et al.* (1991) a mistura não deve fendilhar quando sujeita a cargas repetidas durante a sua vida útil.

Branco *et al.* (2006) referem que uma mistura deve ser impermeável, pois a água em contacto com as camadas granulares reduz a sua capacidade resistente. A impermeabilização é conseguida através de uma correta compactação das misturas de modo a reduzir o número de vazios e pela utilização duma quantidade de betume adequada na mistura.

Os mesmos autores definem a trabalhabilidade como a facilidade com que o material é colocado e compactado em obra. De acordo com Roberts *et al.* (1991), os problemas de trabalhabilidade são normalmente descobertos durante o processo de pavimentação e podem ser solucionados com ajustes na formulação da mistura.

O pavimento deve ainda garantir uma boa aderência aos pneus dos veículos, permitindo realizar as viragens e travagens sem que o veículo deslize. Posto isto, a camada de desgaste não deve conter demasiado betume e os agregados devem possuir uma textura rugosa e resistência ao desgaste (Branco *et al.*, 2006, Roberts *et al.*, 1991).

De acordo com Roberts *et al.* (1991), os principais problemas que os pavimentos flexíveis apresentam e que podem estar relacionados com os materiais da sua constituição, nomeadamente das misturas betuminosas são a deformação permanente, o fendilhamento por fadiga, o fendilhamento por temperaturas baixas, a sensibilidade à água e a total perda de adesão.

As deformações permanentes e o fendilhamento surgem sobretudo devido à suscetibilidade térmica do betume, na medida em que as temperaturas elevadas diminuem a viscosidade do betume facilitando a ocorrência de deformações permanentes, enquanto as temperaturas baixas propiciam o início e propagação das fendas devido à elevada rigidez do betume nessas condições (González *et al.*, 2012, Pérez-Lepe *et al.*, 2003). Importa também salientar que se o pavimento for incorretamente dimensionado, as deformações permanentes podem surgir devido à deformação do solo de fundação, uma vez que este condiciona o comportamento de toda a estrutura.

Por outro lado, o aparecimento de fendilhamento também é facilitado pelo envelhecimento do betume, isto é, o aumento da rigidez devido a processos de oxidação, polimerização e à evaporação dos compostos mais leves do betume. Esta evaporação dos compostos leves (aromáticos) faz com que a quantidade de resinas e asfaltenos aumente, explicando o aumento da rigidez do betume e consequentemente da sua fragilidade. Este envelhecimento do betume ocorre a curto prazo, durante a mistura do betume quente com os agregados (envelhecimento físico-químico rápido devido às temperaturas elevadas) e a longo prazo, *in situ*, durante o período de vida do pavimento (Branco *et al.*, 2006, Lesueur, 2009).

Para além destes problemas típicos das misturas betuminosas, o aumento do tráfego e das cargas aplicadas, bem como a insuficiente manutenção das infraestruturas rodoviárias, faz com que a durabilidade e o desempenho das misturas possam ficar comprometidos acelerando o processo de deterioração das mesmas (Arslan *et al.*, 2011, González *et al.*, 2012, Vargas *et al.*, 2013).

2.2. Misturas betuminosas não convencionais

As condicionantes acima referidas levaram à necessidade de desenvolver betumes que apresentassem características superiores às dos betumes convencionais, nomeadamente os betumes modificados. Estes betumes modificados melhoram o comportamento das misturas betuminosas (Yildirim, 2007) e permitem a construção de estradas mais seguras e com menores custos de manutenção, o que compensa o maior custo que estes betumes apresentam (Larsen *et al.*, 2009). Contudo, esse elevado custo pode ser minimizado se incluírem na sua composição resíduos o que poderá acarretar um elevado benefício ambiental, para além dos benefícios económicos inerentes (Vasudevan *et al.*, 2012).

Por outro lado, estes mesmos condicionantes podem levar a uma degradação prematura das misturas e, como tal, é inevitável a conservação/reabilitação dos pavimentos. Nos países desenvolvidos os trabalhos com a manutenção/reabilitação das estradas sobrepõem-se à construção de novas estradas, criando elevadas quantidades de material fresado, o qual pode ser reciclado e incorporado em novas estradas ou na repavimentação de estradas em fim de vida (Zaumanis *et al.*, 2014).

A reciclagem de material fresado pode ser uma solução para o objetivo de muitos países de reduzir a dependência da importação de produtos derivados do petróleo, tal como o betume. Ao longo dos anos a reciclagem de material fresado tem vindo a ser a alternativa mais utilizada, em alguns países, para a

reabilitação de pavimentos, uma vez que apresenta vantagens na conservação da energia, económicas, ambientais e técnicas (Sengoz e Oylumluoglu, 2013). A reciclagem de pavimentos define-se como uma técnica de reabilitação que se baseia na reutilização dos materiais degradados para a produção de novas misturas (Oliveira, 2003).

2.2.1. Misturas com betume modificado

As misturas betuminosas com betume modificado surgem da necessidade de minimizar os principais problemas das misturas betuminosas: deformação permanente, fendilhamento, suscetibilidade térmica e envelhecimento do betume, em especial quando as condições de serviço são mais exigentes (Branco *et al.*, 2006, Fuentes-Audén *et al.*, 2008).

De acordo com a EAPA (2015), na Europa, o país com maior consumo de betume é a Turquia com 2,73 milhões de toneladas, seguindo-se a França com 2,40 milhões de toneladas. No que concerne a Portugal, a EAPA (2011) refere que o consumo de betume foi de 0,29 milhões de toneladas. No entanto, relativamente ao consumo de betume modificado, a Eslováquia apresenta a maior percentagem atingindo os 42 % do total de betume aí consumido (EAPA, 2015), enquanto em Portugal apenas 1,5 % do betume consumido é modificado (EAPA, 2011). Deste modo é possível verificar que a utilização de betume modificado em Portugal ainda não apresenta valores significativos, apesar das melhorias que este pode provocar nas propriedades das misturas betuminosas. Como tal, o estudo de betumes modificados mais eficazes e económicos pode ter viabilidade no mercado português.

Apesar da quantidade de betume numa mistura betuminosa ser muito inferior à quantidade de agregados, são as suas características que mais condicionam o desempenho do pavimento. Por conseguinte, por vezes utilizam-se aditivos ou modificadores que melhoram as suas propriedades (Ahmedzade, 2013, Arslan *et al.*, 2011).

De acordo com Dehouche *et al.* (2012), os aditivos mais utilizados pela indústria rodoviária são os polímeros. As principais vantagens da sua utilização na modificação de betumes e/ou de misturas betuminosas podem ser as seguintes: obtenção de pavimentos mais flexíveis a temperaturas mais baixas e pavimentos mais rígidos a temperaturas elevadas, aumento da estabilidade e rigidez das misturas, melhoria da resistência à desagregação e à fadiga, redução das espessuras das camadas, redução dos

custos ao longo da vida dos pavimentos e melhoria da resistência do betume à oxidação e ao envelhecimento (Becker *et al.*, 2001).

Por sua vez, de acordo com Fuentes-Audén *et al.* (2008), García-Morales *et al.* (2004) e Kalantar *et al.* (2012) a introdução de polímeros nas misturas betuminosas diminui a suscetibilidade térmica e a deformação permanente, aumenta a resistência ao fendilhamento, a gama de temperaturas de serviço e a durabilidade do betume.

A adição dos polímeros às misturas pode ser realizada através de dois processos, nomeadamente, o húmido (*wet process*) e o seco (*dry process*). O primeiro caracteriza-se pela adição/digestão do polímero diretamente no betume quente que, posteriormente, é misturado com os agregados, enquanto no segundo processo o polímero é adicionado aos agregados e depois finaliza-se a mistura com a adição do betume quente (Celauro *et al.*, 2012, Lesueur, 2009). Todavia, o processo mais utilizado é o *wet process*, uma vez que o *dry process* exibe resultados inferiores nos primeiros anos de vida do pavimento, nomeadamente desagregação prematura na superfície do pavimento (Moreno *et al.*, 2011). Neste estudo será utilizado o *wet process*, pois parte do trabalho irá incidir nas propriedades do ligante modificado e, posteriormente, na avaliação do seu efeito no desempenho nas misturas betuminosas.

De salientar que no *wet process*, o modificador (polímero) deve ser facilmente incorporado no betume, manter-se homogêneo ao longo do armazenamento e originar uma viscosidade do ligante modificado que permita a sua utilização nos equipamentos de produção e de pavimentação rodoviária. Adicionalmente, o modificador deve ser resistente às ações térmicas, à radiação ultravioleta, à água, não emitir substâncias nocivas para o ambiente e deve estar disponível para utilização em elevadas quantidades (García-Morales *et al.*, 2004).

2.2.2. Misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA)

As misturas *Stone Mastic Asphalt* (SMA) foram desenvolvidas na Alemanha com o principal objetivo de criar misturas betuminosas que fossem capazes de resistir às cargas provenientes do elevado tráfego pesado a que as estradas alemãs estavam sujeitas (Woodward *et al.*, 2016).

Devido à sua excelente resistência à deformação permanente, vários países têm vindo a adotar este tipo de mistura. Nos Estados Unidos da América verificou-se que estas misturas aumentam a durabilidade

do pavimento em 20 a 30% comparativamente às misturas convencionais (Ahmadinia *et al.*, 2011). Para além disso, Miranda *et al.* (2013) referem que as misturas SMA são uma alternativa económica e ambientalmente muito interessante devido à sua elevada capacidade de resistir às solicitações do tráfego, e ao consequente aumento de durabilidade já referido por outros autores.

De acordo com Martinho *et al.* (2013) e EAPA (1998), estas misturas são aplicadas maioritariamente em camada de desgaste de pavimentos rodoviários, portuários e aeroportuários, em zonas onde se exija uma maior resistência da mistura, tais como, vias com elevado nível de tráfego pesado, com elevadas inclinações, zonas de travagem, viadutos e túneis.

Para além da sua maior durabilidade, as misturas SMA são também reconhecidas pela sua elevada resistência à deformação permanente (devido ao forte esqueleto pétreo), excelente macrotextura (reduzindo a aspersão de água provocada pelo tráfego sobre o pavimento molhado), bem como pela redução dos níveis de ruído. Contudo, estas misturas apresentam uma resistência ao deslizamento inicial mais baixa, um custo de produção mais elevado comparativamente às misturas convencionais (cerca de 10 a 20%), bem como alguns problemas de exsudação devido a erros ou variabilidade na sua formulação, produção ou aplicação (Ahmadinia *et al.*, 2011, Blazejowski, 2011).

Ao nível da composição, as misturas SMA caracterizam-se por possuir uma granulometria descontínua composta por elevadas quantidades de agregado grosso, filer, betume e também estabilizadores (Blazejowski, 2011, Muniandy *et al.*, 2014). Nesse sentido, a norma EN 13108-5 refere os limites exigidos às curvas granulométricas das misturas SMA, especificando quatro dimensões de peneiros obrigatórios (nomeadamente 20 mm, 14 mm, 2 mm e 0,063 mm para uma mistura SMA 14). Contudo, os limites permitem diferentes configurações de curvas granulométricas, tornando difícil a sua uniformização. Tal como se pode observar na Figura 2.1, as curvas granulométricas das misturas SMA14 de Woodward *et al.* (2016) e de Miranda *et al.* (2013) apresentam configurações diferentes (embora cumpram os limites da norma EN 13108-5), dado que são descontínuas respetivamente abaixo dos peneiros 6,3 mm ou 4 mm.

De acordo com Blazejowski (2011), a regra 30-20-10 sugere que para uma mistura SMA garantir um elevado imbricamento dos agregados (*stone-on-stone contact* na terminologia anglo-saxónica) e uma apropriada descontinuidade típica da sua curva granulométrica, as percentagens de material passado nos peneiros 4,75 mm, 2,36 mm e 0,075 mm devem ser 30%, 20% e 10%, respetivamente.

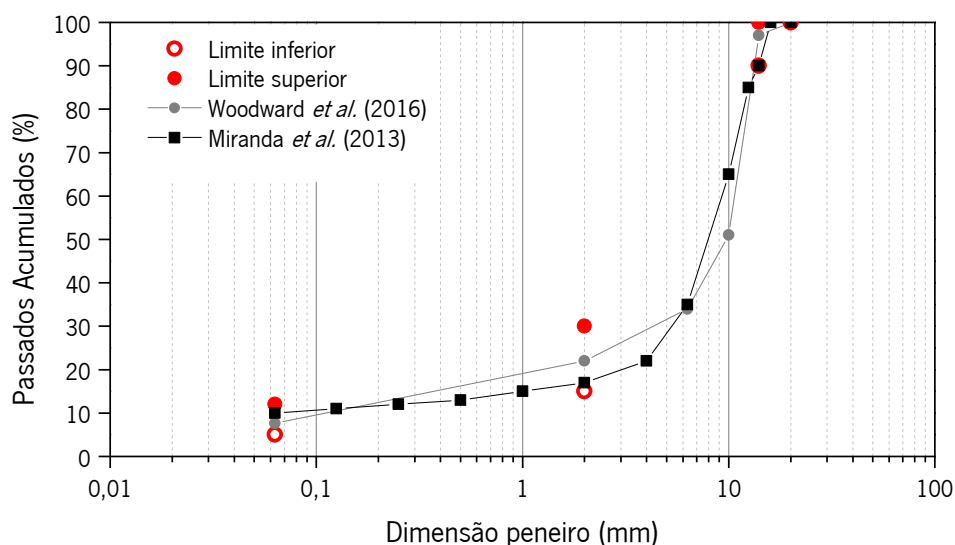


Figura 2.1. Limites especificados e curvas granulométricas já utilizadas em trabalhos anteriores para misturas do tipo SMA 14 (adaptado de Woodward, 2016 e Miranda, 2013).

A elevada quantidade de filler e betume (mástique), bem como a presença de estabilizadores, garante a coesão da mistura, uma maior trabalhabilidade durante o processo de compactação, para além de uma elevada durabilidade e resistência às ações climáticas. Apesar disso, a elevada quantidade de agregados grossos e betume, aliado à granulometria descontínua característica destas misturas, faz com que haja uma maior probabilidade de ocorrer a separação do betume e/ou mástique dos agregados da mistura, denominado escorrimento do betume. Este problema pode ser solucionado através da utilização de betumes modificados e/ou de estabilizadores ou inibidores de escorrimento do betume, tais como, fibras minerais, fibras celulósicas, fibras acrílicas, polímeros, entre outros (Blazejowski, 2011, Miranda et al., 2013). De acordo com Gardete et al. (2011) e Blazejowski (2011), a percentagem de fibras tipicamente utilizadas nas misturas SMA é de cerca de 0,3%.

No que concerne à composição e às características deste tipo de misturas, Sarang *et al.* (2015a) referem que estas devem apresentar um volume de vazios de 4%, uma percentagem de betume mínima de 5,8%, um volume de vazios no agregado compactado (VMA) mínimo de 17% e um valor de escorrimento máximo de 0,3% ao realizar o estudo de formulação *Marshall*, bem como um rácio da resistência à tração indireta (ITSR) mínimo de 80%. Por sua vez, de acordo com a especificação americana *Quality Improvement Series 122* da NAPA (2002), a percentagem de betume deve ser superior a 6%, o volume de vazios superior a 4%, o valor de escorrimento inferior a 0,3% e o valor de ITSR superior a 70%. Importa

salientar que a norma EN 13108-5 apenas admite uma percentagem mínima de betume para misturas SMA de 5,0%.

Por sua vez, de acordo com Blazejowski (2011), as misturas SMA devem apresentar um volume de vazios de valor inferior a 6%. No entanto, o mesmo autor refere que as normas alemãs aconselham um máximo de 5% para esse valor de modo a garantir a durabilidade da mistura, em especial para reduzir a permeabilidade e o efeito da água nos ciclos gelo/degelo. Salienta-se ainda que um insuficiente volume de vazios (menor do que 3%) pode diminuir a resistência à deformação permanente da mistura. Chena *et al.* (2009) também referem que um excesso de volume de vazios pode levar a um deficiente revestimento do betume nos agregados e, conseqüentemente, a um aumento do fendilhamento e da sensibilidade à água da mistura.

A norma EN 13108-5 relativa às misturas SMA refere ainda a possibilidade de utilizar material fresado desde que se cumpram os requisitos estipulados na norma EN 13108-8 relativa às características do material fresado (e.g. teor em betume, máxima dimensão do agregado do material fresado, características do betume envelhecido). Para além disso, a dimensão máxima do material fresado deve ser igual ou inferior à dimensão máxima da mistura SMA a produzir.

As distintas propriedades mecânicas e funcionais destas misturas, as elevadas percentagens de betume (que assim tem um maior impacto no desempenho das misturas) e o facto de se poder incluir material fresado na sua constituição, levaram à seleção deste tipo de misturas para avaliação dos betumes modificados com resíduos desenvolvidos neste trabalho.

2.2.3. Misturas betuminosas recicladas

De acordo com Branco *et al.* (2006), a reciclagem de pavimentos flexíveis consiste em utilizar o material fresado dos pavimentos a reabilitar na produção de novas misturas, adicionando parcialmente novos agregados e ligante.

A reciclagem apresenta vantagens a nível ambiental, tais como, a redução da quantidade de agregados e betumes novos utilizados, a diminuição das áreas de vazadouro para o depósito do material degradado e o menor consumo de energia. Para além das vantagens ambientais, a reciclagem de pavimentos flexíveis pode ser uma solução mais económica comparativamente ao reforço tradicional e permite a

resolução dos problemas de fendilhamento, irregularidades e/ou restantes patologias (Branco *et al.*, 2006, INIR, 2012).

Todavia, existem aspetos que podem ser melhorados, nomeadamente a definição dos estudos de formulação e do controlo das propriedades dos materiais, assim como o conhecimento do comportamento dos materiais reciclados a curto e longo prazo (INIR, 2012).

As técnicas de reciclagem podem ser caracterizadas quanto ao local (*in situ* ou em central), quanto à temperatura (a frio ou a quente) e quanto ao tipo de ligante (ligantes hidráulicos, ligantes hidrocarbonados ou aditivos químicos) (Baptista, 2006, Branco *et al.*, 2006). Neste caso, as diferentes técnicas serão divididas tendo em conta o local onde são realizadas. Nas técnicas de reciclagem *in situ*, depois da escarificação das camadas betuminosas e/ou granulares adiciona-se o ligante, sendo as operações de mistura e espalhamento do material reciclado realizadas de forma consecutiva imediatamente a seguir. Neste tipo de técnica praticamente todo o material fresado é utilizado nas misturas novas. Por sua vez, na reciclagem em central o material fresado do pavimento degradado é transportado para a central, sendo posteriormente integrado em menores quantidades na produção das misturas recicladas, que podem ser utilizadas no local de origem do material fresado ou noutras obras (Baptista, 2006).

A reciclagem *in situ*, a frio, com cimento é normalmente utilizada em pavimentos com grande espessura de camadas granulares e camadas betuminosas bastante degradadas. A este material fresado é adicionado o cimento (a seco ou em calda) fazendo com que a camada reciclada apresente uma resistência muito superior à camada inicial. Contudo, esta camada não poderá ser considerada uma camada de desgaste, sendo necessário aplicar uma camada de reforço para limitar a ocorrência de fendilhamento característico da camada reciclada (ARRA, 2001, Baptista, 2006).

Na reciclagem *in situ*, a frio, com emulsão betuminosa, esta é adicionada ao material a reciclar e, caso seja necessário, aos materiais de correção, em conjunto com a água necessária para facilitar a compactação do material (Baptista, 2006). Por sua vez, esta técnica apresenta algumas desvantagens, tais como o seu elevado custo e a sensibilidade às condições meteorológicas (em zonas húmidas o processo de rotura da emulsão não é favorável) (Martinho, 2004).

A reciclagem *in situ*, a frio, com betume-espuma consiste na adição desse ligante ao material a reciclar (misturas betuminosas e/ou camadas granulares). Esta técnica melhora a resistência ao corte e reduz a

suscetibilidade à água das camadas granulares recicladas. Para além disso não é necessário nenhum processo de cura, podendo a circulação ser reposta logo após compactação (Baptista, 2006).

Na reciclagem *in situ*, a quente, geralmente é utilizado um rejuvenescedor, podendo ser combinado com a incorporação de novas misturas. Este tipo de reciclagem pode ser executado através de dois processos, designadamente a termo-reperfilagem (o pavimento é aquecido e compactado para selar fendas ou restituir a regularidade longitudinal do pavimento) e a termo-regeneração (as camadas betuminosas são aquecidas, escarificadas, recompostas, niveladas e compactadas numa nova camada, havendo necessidade de colocar uma nova camada de desgaste). Porém, esta técnica apresenta alguns inconvenientes relacionados com o seu elevado custo e consumo de energia, com a dificuldade de aplicação da técnica em locais com obstáculos e com a poluição significativa que provoca (Branco *et al.*, 2006).

A reciclagem em central, a frio, com emulsão betuminosa é realizada após fresagem e transporte das camadas de pavimentos para a central, onde a emulsão betuminosa é adicionada à temperatura ambiente e, se necessário, são incorporados agregados novos. De salientar que durante o período de cura (fase de rotura da emulsão) existem algumas limitações quanto às condições meteorológicas para aplicação destas misturas (Baptista, 2006, Branco *et al.*, 2006).

O processo de reciclagem em central, a frio, com betume-espuma é semelhante à técnica anterior, com a exceção do tipo de ligante. Caso o material fresado apresente uma granulometria muito variável e que não se adapta aos limites estabelecidos para a mistura a produzir, pode ser necessário proceder à britagem do mesmo ou à reconstituição granulométrica da mistura (Martinho, 2004).

Mais recentemente foi desenvolvido um outro processo de reciclagem temperada em central, com emulsão betuminosa. Como se trata igualmente de um processo de reciclagem em central, é necessário fresar o pavimento degradado, transportá-lo para o local da central e posteriormente adicionar a emulsão betuminosa. Se o material fresado apresentar granulometria bastante variável e que não cumpra com os limites especificados na norma também é necessário recorrer à sua britagem. Nesta técnica é possível utilizar a totalidade do material fresado na mistura reciclada e esta ainda permite que a abertura ao tráfego seja imediata, não sendo necessário o normal tempo de cura de uma reciclagem a frio com emulsão (Baptista, 2006, Martinho, 2004).

A reciclagem em central, a quente, com betume resume-se a utilizar o material fresado para o fabrico de uma mistura betuminosa com um desempenho semelhante a uma mistura sem material reciclado, aos quais se adicionam materiais corretivos, agregados e betume novos e/ou um agente reciclador. Este processo acarreta vantagens económicas e ambientais pois reduz-se a utilização de agregados e betume novo e ainda são aplicados materiais provenientes da fresagem dos pavimentos (numa taxa máxima que, de acordo com Branco *et al.* (2006), pode variar entre 35% a 70%, em função do tipo de central de produção utilizada), cujo destino poderia ser o vazadouro.

Para além disso, após o processo de reciclagem, as misturas devem exibir um comportamento mecânico igual ao das misturas convencionais. As principais desvantagens deste tipo de mistura betuminosa prendem-se com a redução da capacidade de produção das centrais e com a necessidade de maior aquecimento dos agregados, o que poderá conduzir a maiores gastos energéticos e emissões de CO₂ (Baptista, 2006).

De acordo com os dados da EAPA (2011) em Portugal, no ano de 2011, estavam disponíveis 2000 toneladas de material fresado, das quais 60% foram utilizadas em reciclagem a quente, 5% em reciclagem a frio e 15% em camadas não ligadas. Contudo, existem países onde a quantidade de material fresado disponível é muito elevada e cuja percentagem utilizada em reciclagem em camadas ligadas é muito reduzida. Exemplo disso é a Turquia que apenas utiliza 2% dos 1,5 milhões de toneladas de material fresado em reciclagem a quente. Os restantes 98% de material fresado são usados em camadas não ligadas (EAPA, 2015).

Apesar disso, alguns países Europeus, bem como os Estados Unidos da América têm vindo a utilizar praticamente a totalidade do material fresado que têm disponível na produção de novas misturas a quente, temperadas ou a frio, na reciclagem a frio e em camadas não ligadas.

A título de exemplo, no ano de 2015, dos 11 milhões de toneladas de material fresado disponível na Alemanha foram reciclados 90% na produção de misturas betuminosas a quente e 10% em camadas não ligadas. Nenhuma quantidade de material fresado teve como destino vazadouros, reciclando a totalidade do material fresado disponível em novos pavimentos.

Por sua vez, nos Estados Unidos da América dos 69,7 milhões de toneladas de material fresado disponível 91% é reutilizado na produção de misturas betuminosas a quente e temperadas, 6% em

camadas não ligadas, 2% noutras aplicações da área da Engenharia Civil, sendo que apenas 1% termina em aterro. Pode assim constatar-se que a maioria do material fresado é utilizado na produção de misturas betuminosas a quente e/ou temperadas, ou seja, misturas muito utilizadas na construção de novas estradas e na reabilitação/conservação de estradas em fim de vida.

Deste modo é possível verificar que o uso de técnicas de reciclagem de pavimentos é um processo em expansão a nível Europeu, muito devido às vantagens ambientais associadas, nomeadamente a diminuição da utilização de recursos naturais e a reciclagem de resíduos, cuja legislação europeia impõe em todas as áreas. Como tal, é importante que se continuem a desenvolver estudos que permitam melhorar a formulação e as características das misturas recicladas, maximizando a reutilização de resíduos, quer provenientes de pavimentos degradados, quer de outro tipo de indústria.

2.3. Modificação de betume com polímeros

Tal como foi referido anteriormente, a modificação de betumes tem como principal finalidade melhorar as propriedades do betume e, consequentemente, das misturas betuminosas. As principais razões que levam à modificação do betume com polímeros podem ser resumidas da seguinte forma: i) obter betumes mais flexíveis a baixas temperaturas, reduzindo o fendilhamento; ii) obter betumes mais rígidos a elevadas temperaturas, reduzindo a deformação permanente; iii) aumentar a estabilidade das misturas betuminosas; iv) melhorar a resistência à desagregação; v) incrementar a resistência à oxidação e ao envelhecimento; vi) reduzir a espessura dos pavimentos; e, vii) reduzir o custo do ciclo de vida dos pavimentos (Becker *et al.*, 2001).

Para além disso, a modificação com polímeros permite melhorar as características termomecânicas do betume, assim como, a sua elasticidade e adesividade (Pérez-Lepe *et al.*, 2003). Segundo Yildirim (2007) e Attaelmanan *et al.* (2011), os betumes modificados com polímeros devem apresentar maior recuperação elástica, coesão e ductilidade, devendo ainda ter um ponto de amolecimento mais elevado e uma viscosidade superior.

Os polímeros definem-se como um conjunto de unidades químicas repetidas, ligadas entre si formando uma cadeia molecular (Bower, 2004, Mano, 1985). Estas unidades químicas, ou pequenas moléculas, denominam-se monómeros, que após reação química formam polímeros.

A quantidade e o tipo de polímero utilizado na modificação de betumes influenciam as propriedades dos betumes e, naturalmente, das misturas betuminosas. Grandes concentrações de polímero são inviáveis a nível económico e ainda acarretam problemas em algumas propriedades do ligante (Attaelmanan *et al.*, 2011). Por sua vez, baixas quantidades de polímero aumentam a consistência e as propriedades elásticas do ligante, uma vez que a fase contínua do betume é enriquecida com resinas e asfaltenos (Kalantar *et al.*, 2012).

De acordo com Attaelmanan *et al.* (2011) e Dehouche *et al.* (2012) as concentrações de polímero utilizadas na modificação de betumes variam habitualmente de 3% a 7%. Contudo, segundo Kalantar *et al.* (2012) nas últimas décadas as percentagens mais utilizadas são 5% e 6% de polímero. Apesar disso, tendo em conta o tipo de polímero a utilizar as percentagens podem ser maiores sem com isso comprometer o seu desempenho. Exemplo disso é a borracha de pneus usados que pode ser utilizada no processo de modificação de betume em percentagens muito superiores às previamente mencionadas, podendo atingir os 20% (Kök e Çolak, 2011, Lo Presti, 2013, Peralta *et al.*, 2013, Sarang *et al.*, 2015b).

Apesar da quantidade de polímero aplicado na modificação de betumes em alguns casos ser pequena, a utilização de polímeros sintéticos na modificação do betume tem um custo elevado, o que poderá ser um impedimento para este tipo de solução. Deste modo, surge a necessidade de procurar alternativas aos polímeros sintéticos (virgens), nomeadamente, os polímeros reciclados.

Apesar de os polímeros reciclados não possuírem as características mecânicas de um polímero virgem e, como tal, não poderem ser utilizados nos seus habituais campos de aplicação, estes apresentam resultados semelhantes aos sintéticos quando incorporados no betume. Aliado a este facto está associada a vantagem ambiental, uma vez que se recicla um resíduo que eventualmente seria colocado em aterro. Para além disso, existe a vantagem económica de utilizar um resíduo que apresenta custos mais reduzidos quando comparados com os polímeros virgens (Fuentes-Audén *et al.*, 2008, González *et al.*, 2012).

A maioria dos polímeros usados na modificação do betume pode ser dividida em plastómeros e elastómeros. Os plastómeros são constituídos por substâncias poliméricas orgânicas (provenientes do carvão e do petróleo) de elevado peso molecular, incorporadas com aditivos que melhoram as suas propriedades mecânicas e físico-químicas (i.e. aumento da rigidez). A transformação dos plastómeros

ocorre a elevada temperatura e pressão, quando estes se encontram no estado viscoso, possibilitando a sua moldagem (Saechtling, 1995). No entanto, à temperatura ambiente, apresentam-se no estado sólido.

Os elastómeros, por sua vez, caracterizam-se por exibir um comportamento elástico à temperatura ambiente quando submetidos a uma deformação (Mano, 1985). Esta flexibilidade deve-se às suas longas cadeias aleatórias, que enrolam e desenrolam quando sujeitos a uma deformação (tal como uma mola). Este tipo de polímero possui elevada flexibilidade a baixas temperaturas e resistência a ácidos, bases e óleos (Crawford, 1992).

O processo de modificação do betume com polímeros (plastómeros ou elastómeros) deve ser realizado à menor temperatura e tempo possível, desde que haja uma total incorporação do polímero no betume. Deste modo, reduz-se os custos económicos e minimiza-se os efeitos térmicos sobre os polímeros e sobre o betume. Estas condições (temperatura e tempo) influenciam a estrutura e as propriedades dos betumes modificados com polímeros, uma vez que quanto maior a temperatura mais rápido é o processo e, quanto maior o tempo de mistura mais homogênea é a microestrutura (dispersão do polímero no betume) (Kalantar *et al.*, 2012).

Os mesmos autores salientam que o tipo de misturador utilizado (baixo corte ou alto corte) também condiciona o processo de mistura. O misturador de baixo corte é utilizado em polímeros em pó e este processo é limitado pelo inchamento e dissolução do polímero no betume. Já o misturador de alto corte reduz o tamanho das partículas do polímero (por corte mecânico e hidrodinâmico) e a temperatura sofre um aumento durante a mistura ao dissolver o polímero no betume de forma mais homogênea.

Os polímeros mais utilizados na modificação de betumes são o estireno-butadieno-estireno (SBS), o estireno-butadieno-borracha (SBR), o etileno-acetato de vinilo (EVA), o polietileno (PE) e resíduos poliméricos, tais como plásticos (normalmente polietileno) e borracha de pneus usados (Cuadri *et al.*, 2014).

Em seguida serão nomeadas as principais alterações provocadas no betume e nas misturas betuminosas pela utilização dos polímeros mais utilizados na modificação de betumes. De salientar que será dada mais ênfase aos polímeros que serão usados neste estudo, nomeadamente o polietileno de alta densidade (HDPE), o estireno-butadieno-estireno (SBS) e a borracha de pneus (CR).

2.3.1. Modificação com plastómeros

Os plastómeros provocam um aumento da rigidez e da resistência das misturas sob tráfego muito pesado devido ao aumento da viscosidade (Ahmadinia *et al.*, 2011). De entre os diferentes plastómeros, os mais comuns são o polipropileno (PP), o policloreto de vinilo (PVC), o etileno-acetato de vinilo (EVA) e o polietileno (de alta densidade ou de baixa densidade) (Becker *et al.*, 2001, Casey *et al.*, 2008, Kalantar *et al.*, 2012).

A modificação de betume com polipropileno (PP), proveniente de embalagens, caracteriza-se pela sua fácil manipulação na fase de produção, elevada temperatura de amolecimento e baixo valor de penetração, o que implica um aumento da rigidez do betume e, além disso, ainda melhora a resistência sob a ação de cargas. Todavia, ocorrem problemas de separação entre o polímero e o betume após armazenamento, não apresenta melhorias no que concerne à elasticidade e, como tal, exibe uma baixa resistência à fadiga a baixas temperaturas (Becker *et al.*, 2001, Casey *et al.*, 2008, Kalantar *et al.*, 2012).

Os mesmos autores referem que ao utilizar policloreto de vinilo (PVC) na modificação de betume é possível reduzir o fendilhamento das misturas e, como existe em grande quantidade, a sua utilização na pavimentação poderia ser uma boa solução. Contudo, este polímero exibe uma elevada temperatura de fusão, o que torna difícil a sua dispersão no betume.

De acordo com Sengoz e Isikyakar (2008), apesar de ser considerado um plastómero, o etileno-acetato de vinilo (EVA) possui características compreendidas entre o polietileno de baixa densidade (LDPE) e certos tipos de borrachas. Quando este polímero é adicionado ao betume cria uma resistente e rígida rede tridimensional para resistir à deformação. Já Airey (2002) refere que o EVA era um polímero usado há mais de 20 anos na pavimentação rodoviária, com o principal objetivo de aumentar a trabalhabilidade na fase de aplicação da mistura e para resistir à deformação permanente.

A sua resistência à deformação permanente é conseguida devido ao aumento da rigidez do betume (apresenta baixa penetração e elevado ponto de amolecimento) e da diminuição da suscetibilidade térmica. Estas alterações provocadas pelo EVA também foram verificadas por outros autores, tais como Garcia-Morales *et al.* (2006) e Dehouche *et al.* (2012). No entanto, Dehouche *et al.* (2012) também referiram que o EVA confere ao betume um comportamento elástico, semelhante à borracha, o que provoca uma melhoria da resistência ao fendilhamento a baixas temperaturas. Becker *et al.* (2001) ainda

referiu a excelente compatibilidade que o EVA possui com o betume, um dos requisitos fundamentais de um polímero utilizado na modificação. O EVA reciclado pode ser obtido através de películas de plástico da agricultura, usadas em especial nas estufas (García-Morales *et al.*, 2006, García-Morales *et al.*, 2004).

No que concerne ao polietileno, inicialmente serão enumeradas as principais características e, em seguida, as alterações que este provoca no betume. Para além disso, também será descrito o processo de fabrico, características e efeitos que o polietileno de alta densidade (HDPE) provoca na modificação de betume, uma vez que será um dos resíduos poliméricos a utilizar neste estudo.

Segundo Crawford (1992), o polietileno é formado através da polimerização por adição do monómero de etileno. O monómero de etileno é obtido através do processo de fratura química a vapor da fração nafta (hidrocarbonetos resultantes da destilação do petróleo natural) ou de líquidos de gás natural (Garforth e Stancliffe, 1994).

Este monómero possui uma ligação dupla de carbono, que se quebra durante este processo, permitindo que as ligações simples de carbono se liguem a outras unidades para formar uma longa cadeia de grupos de metileno (CH_2). A representação do monómero de etileno e da molécula de polietileno podem ser visualizadas na Figura 2.2.

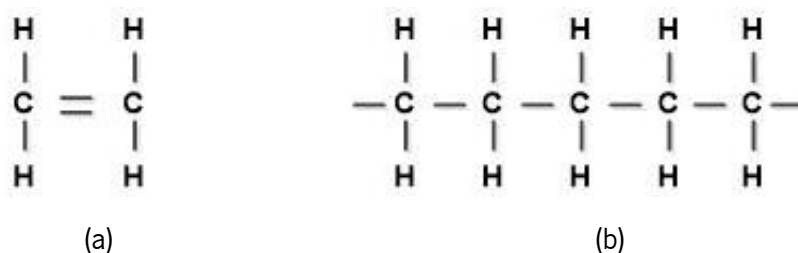


Figura 2.2. Representação do a) monómero de etileno e da b) molécula de polietileno (adaptado de Crawford, 1992).

Segundo Becker *et al.* (2001) e Kalantar *et al.* (2012), a modificação do betume com o polietileno apresenta uma maior resistência ao envelhecimento e às temperaturas elevadas, bem como elevado módulo de rigidez. Fuentes-Audén *et al.* (2008) referem ainda que o polietileno aumenta a viscosidade do betume e diminui a sua suscetibilidade térmica. Além disso, pode melhorar as características mecânicas da mistura, nomeadamente a resistência à deformação permanente e ao fendilhamento, quer

devido à fadiga, quer devido a ações térmicas. Não obstante, o polietileno exibe alguns problemas de instabilidade ao armazenamento e não apresenta resposta elástica significativa (Kalantar *et al.*, 2012).

Depois de apresentadas as principais características do polietileno, onde se inclui o polietileno de baixa densidade (LDPE) e o polietileno de alta densidade (HDPE), irá proceder-se à particularização das principais características do HDPE e alguns estudos sobre modificação de betumes com este polímero, uma vez que será um dos polímeros a utilizar neste estudo.

O polietileno de alta densidade (HDPE) é fabricado a pressões muito reduzidas através do método *Ziegler* ou do método *Phillips*. No primeiro método, a pressão encontra-se compreendida entre 0,1 MPa e 5 MPa e a temperatura numa gama de valores entre os 20 °C e os 150 °C. No segundo método, a pressão situa-se entre os 3 MPa e 4 MPa e a temperatura entre os 85 °C e os 180 °C (Domininghaus, 1993). Sob estas condições formam-se cadeias lineares com 5 a 10 pequenas ramificações por cada 1000 átomos de carbono (Figura 2.3). Quanto mais pequenas as ramificações, maior é o grau de cristalinidade (relação entre o volume da parte cristalina e o volume da parte amorfa) e a densidade.



Figura 2.3. Representação da estrutura molecular do polietileno de alta densidade (adaptado de Osswald e Menges, 1996).

Como tal, o grau de cristalinidade do HDPE é de 60% a 80% e a densidade de cerca de 0,942 g/cm³ a 0,965 g/cm³ (Osswald e Menges, 1996). Como possui zonas amorfas (moléculas que não apresentam nenhum tipo de ordem) e zonas cristalinas (configuração ordenada e regular), o HDPE exibe uma temperatura de transição vítrea aos -85 °C e uma temperatura de fusão aos 136 °C. Como principais características, o HDPE tem uma elevada resistência à tração, rigidez e temperatura de fusão comparativamente ao LDPE (Garforth e Stancliffe, 1994).

O polietileno de alta densidade reciclado encontra-se em grandes quantidades em embalagens e garrafas de plástico (Casey *et al.*, 2008), sendo assim um polímero que está disponível em elevadas quantidades e a um preço mais reduzido (Figura 2.4). A adição deste polímero no betume aumenta significativamente a estabilidade e durabilidade da mistura e também pode apresentar bons resultados de resistência à fadiga (Ahmadinia *et al.*, 2011).

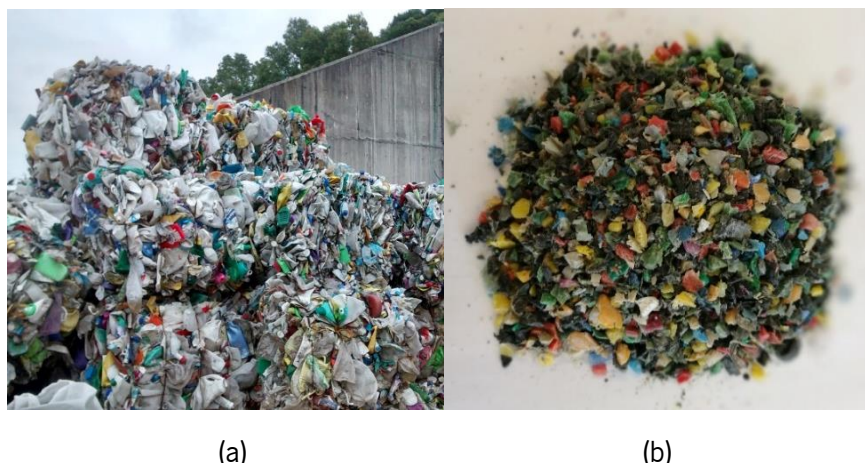


Figura 2.4. Polietileno de alta densidade reciclado: (a) origem e (b) após moagem.

De acordo com Al-Hadidy e Yi-Qiu (2009) e Hınıslioğlu e Ağar (2004) a utilização de HDPE faz com que a penetração diminua (indica uma melhoria na resistência a temperaturas médias), o ponto de amolecimento aumente (implica uma maior resistência à deformação) e a resistência da mistura à ação e à variação da temperatura aumente. Segundo Costa *et al.* (2013a), o HDPE é facilmente disperso no betume, apresentando boa compatibilidade, embora apresente alguns problemas no que concerne à estabilidade ao armazenamento.

2.3.2. Modificação com elastômeros

No que concerne aos elastômeros, os mais utilizados são a borracha natural, o estireno-butadieno-borracha (SBR), o estireno-butadieno-estireno (SBS) e a borracha de pneus reciclados (Becker *et al.*, 2001, Casey *et al.*, 2008, Kalantar *et al.*, 2012).

A borracha natural, como qualquer elastômero, melhora a resistência à deformação permanente e apresenta elevada ductilidade e elevada elasticidade sob cargas cíclicas (Becker *et al.*, 2001, Yildirim, 2007). Todavia, a borracha natural é muito sensível à decomposição e à absorção de oxigênio, dificultando a sua utilização na pavimentação rodoviária. Para além disso, necessita de elevada temperatura e tempo de digestão para modificar o betume. Esta dificuldade de dispersão no betume ocorre devido ao seu elevado peso molecular que torna a compatibilidade com o betume muito baixa (Yildirim, 2007).

O estireno-butadieno-borracha (SBR) é empregue na modificação do betume com o objetivo de melhorar as propriedades termoplásticas do betume. Aliado a esta melhoria, o SBR também aumenta a

viscosidade e melhora a resistência do betume à oxidação (Dessouky *et al.*, 2013). De acordo com Yildirim (2007), o SBR também melhora a ductilidade a baixas temperaturas, a recuperação elástica, bem como as propriedades adesivas e coesivas.

O estireno-butadieno-estireno (SBS) é um copolímero em bloco produzido em solução através de polimerização aniônica (Rosen, 1982). Esta reação é utilizada para polimerizar os monómeros de estireno e de butadieno e, geralmente, é realizada num solvente inerte de hidrocarboneto (ciclo-hexano ou tolueno) sem contacto com oxigénio, água ou qualquer impureza que possa afetar a reação.

O SBS caracteriza-se como um elastómero termoplástico por ser constituído por duas fases, a fase de poliestireno e a fase de polibutadieno. Estas duas fases conferem as propriedades dos respetivos homopolímeros. Por exemplo, à temperatura ambiente a fase do poliestireno é forte e rígida, enquanto a fase do polibutadieno é elástica (Holden *et al.*, 1996).

Segundo Sengoz e Isikyakar (2008), a rigidez e elasticidade do SBS devem-se à ligação física e reticulada das moléculas numa rede tridimensional. A sua estrutura molecular (Figura 2.5) possui nas extremidades os blocos de poliestireno que conferem rigidez, enquanto os blocos de polibutadieno concedem a excecional elasticidade do material. Deste modo, e de acordo com Holden *et al.* (1996), o seu comportamento à temperatura ambiente é semelhante a uma borracha, só que quando é aquecido a reticulação perde força e o polímero perde viscosidade, voltando às características iniciais quando arrefecido.

Como se trata de um polímero em bloco e por se tratar de um polímero amorfo, o SBS apresenta duas temperaturas de transição vítrea, correspondentes às temperaturas vítreas dos homopolímeros da sua constituição. O butadieno e o estireno apresentam uma temperatura de transição vítrea de -90 °C e de aproximadamente 100 °C, respetivamente (Drobny, 2007, Kennedy *et al.*, 2009). Contudo, ao analisar termicamente o SBS, a temperatura de transição vítrea referente ao estireno sofre uma redução quando comparada ao homopolímero com a mesma estrutura molecular, ou seja, apresenta o valor de 67 °C ao invés dos 100 °C, já referidos. Tal facto deve-se aos movimentos moleculares prematuros que os blocos de butadieno induzem nos blocos de estireno, reduzindo a sua capacidade termodinâmica (Kennedy *et al.*, 2009). A densidade do estireno-butadieno-estireno encontra-se compreendida entre 0,930 g/cm³ e 1,100 g/cm³ (Crawford, 1985).

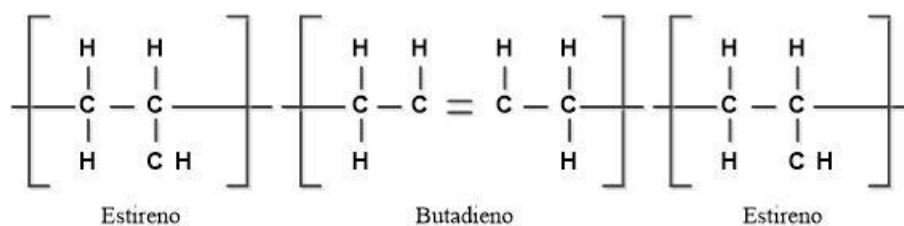


Figura 2.5. Representação da estrutura molecular do estireno-butadieno-estireno (adaptado de Harper, 1975).

Segundo Yildirim (2007) e Becker *et al.* (2001), o SBS é provavelmente o polímero mais adequado e utilizado na modificação de betumes. De acordo com Ahmedzade (2013), a adição de SBS no betume melhora as suas propriedades elásticas e aumenta a resistência à deformação permanente em climas com elevada temperatura, aumentando também a resistência ao fendilhamento por fadiga a baixas temperaturas. A mistura do SBS com o betume apresenta baixos valores de penetração e elevado ponto de amolecimento, o que leva ao aumento da rigidez do betume. Além das características mencionadas anteriormente, também constatadas por Anjan kumar e Veeraragavan (2011) e Dehouche *et al.* (2012), estes referem ainda que o SBS reduz a suscetibilidade térmica do betume.

Contudo, Kalantar *et al.* (2012) menciona, como desvantagens, o custo elevado do polímero e o facto da sua resistência ao calor e à oxidação ser mais baixa, quando comparada com outros polímeros (e.g., polietileno). Para além disso, no estudo de Costa *et al.* (2013a), onde se avaliou a utilização de partículas de SBS de diferentes dimensões, refere-se que o SBS deve ser utilizado em pequenas dimensões para facilitar a digestão no betume. Adicionalmente, esses autores também mencionam que os betumes com SBS podem apresentar alguns problemas de estabilidade ao armazenamento. Na Figura 2.6 é possível visualizar o aspecto do polímero SBS, que será outro dos polímeros usados neste trabalho.



Figura 2.6. Estireno-Butadieno-Estireno.

A borracha de pneus (vulcanizada) é um resíduo que constitui um sério problema ambiental em vários países devido à sua rápida acumulação e difícil eliminação. Tal como acontece com outros resíduos, também este foi introduzido nas misturas betuminosas para melhorar as suas propriedades e por ser benéfico a nível ambiental (Fontes *et al.*, 2010).

Os pneus são compostos por três principais constituintes, borracha natural (NR) e sintética (SR) vulcanizadas, aço e fibras. A borracha compõe cerca de 60% em peso da constituição final do pneu e a razão entre a presença de borracha natural e borracha sintética (i.e. estireno-butadieno-borracha) depende da finalidade a que o pneu se destina. Por exemplo, os pneus de veículos pesados apresentam maior quantidade de estireno-butadieno-borracha do que de borracha natural (Ghavibazoo e Abdelrahman, 2013, Thodesen *et al.*, 2009).

De forma a obter a borracha de pneus usados utilizada na pavimentação rodoviária é necessário que os pneus sofram um processo de moagem que pode ser designado como processo ambiental ou criogénico.

No processo ambiental todas as etapas que levam à redução do tamanho do pneu ocorrem à temperatura ambiente, isto é, nenhum arrefecimento é aplicado para tornar a borracha mais vítrea e facilitar o processo de redução de dimensão (Peralta, 2013, Shu e Huang, 2014). A moagem é realizada mecanicamente com auxílio de lâminas rotativas, no qual a etapa mais crítica é a separação das fibras, as quais geralmente incluem fibras de aço. Após a separação do material metálico é possível obter as partículas de borracha de pneu usado com diferentes granulometrias (Lo Presti, 2013). O mesmo autor refere ainda que o processo ambiental é muito usado por fornecer partículas de borracha com forma irregular e áreas superficiais relativamente grandes que promovem a interação da borracha com o betume.

Por sua vez, no processo criogénico os pneus são arrefecidos até uma temperatura inferior a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura de transição vítrea a partir do qual a borracha se torna frágil como vidro) e a redução do tamanho do pneu é realizada pelo impacto do material nos moinhos de martelos, em poucos segundos, numa atmosfera inerte (Recipneu, 2017, Reschner, 2008). De acordo com Recipneu (2017), o processo criogénico permite a completa e individualizada separação da borracha, aço e fibras sem desperdício considerável ou perdas de material.

Deste modo, os pneus usados são utilizados nos pavimentos na forma de grânulos de borracha numa gama de tamanhos compreendida entre 0,0075 mm e 4,75 mm (Shu e Huang, 2014). A sua densidade é de aproximadamente 1,15 g/cm³ e não deve conter fibras têxteis ou de aço, nem outro tipo de contaminantes (Chesner *et al.*, 1998).

As propriedades da borracha de pneu usado, o método de produção (ambiental ou criogénica), a dimensão dos grânulos, a superfície específica e a sua composição química (i.e., quantidade de borracha natural) podem afetar a interação com o betume (Putman e Amirkhanian, 2006).

A composição do betume é um dos principais fatores que afetam a interação do betume com a borracha, isto porque as frações leves do betume incham as partículas de borracha. Alguns autores, nomeadamente Ould-Henia e Dumont (2006) recomendam a utilização de betumes base que contenham elevadas frações aromáticas de modo a existir melhor compatibilidade entre o betume e a borracha. Deste modo, betumes com elevada penetração são mais compatíveis com a borracha do que betumes mais rígidos (de baixa penetração). Assim, as alterações na borracha não resultam da fusão dos grânulos de borracha com o betume, mas do inchamento por absorção dos componentes aromáticos (fração leve) a elevadas temperaturas (entre 160 °C e 200 °C), formando uma espécie de gel (Lo Presti *et al.*, 2014, Peralta, 2013).

De acordo com a norma ASTM D 6114, os betumes borracha são obtidos pela combinação de betume, borracha de pneus usados e outros aditivos, se necessário. Os aditivos normalmente utilizados são óleos de diluição que melhoram a trabalhabilidade destes betumes e/ou a compatibilidade betume-borracha.

Quando adicionada ao betume, a borracha reciclada de pneus usados aumenta a sua rigidez, uma vez que o valor da penetração decresce e a temperatura de amolecimento aumenta (Peralta *et al.*, 2012). Liang *et al.* (2015) corroboram o aumento da viscosidade e temperatura de amolecimento, referindo ainda uma melhoria do índice de penetração e uma elevada ductilidade a baixas temperaturas, o que leva a uma maior resistência ao fendilhamento.

Outros autores indicam a redução da deformação permanente, do fendilhamento a baixas temperaturas e da reflexão de fendas como características conferidas às misturas betuminosas pela borracha, o que consequentemente aumenta a durabilidade do pavimento (Navarro *et al.*, 2002, Yildirim, 2007). Adicionalmente, segundo Becker *et al.* (2001) e Yildirim (2007), a borracha de pneus usados (Figura

2.7) acarreta benefícios ambientais e em certos casos pode reduzir os custos de construção/reabilitação ao diminuir as espessuras das camadas de pavimento devido à sua elevada durabilidade e flexibilidade.



Figura 2.7. Borracha de pneu usado: (a) origem e (b) após processo criogénico, respetivamente.

Porém, na modificação de betumes com borracha de pneus usados são necessários tempos de digestão e temperaturas de mistura bastante elevados de forma a dispersar a borracha no betume, verificando-se ainda uma baixa estabilidade ao armazenamento. Isto porque a interação betume/borracha é muito afetada pelo tempo e temperatura, ou seja, se a temperatura ou tempo de digestão for demasiado elevada a absorção da borracha continua até atingir um ponto em que é substituída pela despolimerização, o que leva a uma redução da viscosidade do betume e à diminuição da resistência ao envelhecimento (Putman e Amirkhanian, 2006).

2.4. Modificação de betume com produtos derivados de óleo de motor

Tal como foi mencionado anteriormente, o betume contido no material fresado não pode ser utilizado como betume convencional devido ao envelhecimento a que esteve sujeito (DeDene *et al.*, 2014). O envelhecimento do betume provoca mudanças nas suas propriedades físicas, tais como, aumento da temperatura de amolecimento, redução do valor de penetração, variações nas propriedades reológicas, nomeadamente aumento do módulo complexo e da viscosidade. Para além das propriedades físicas, ocorrem também alterações nas propriedades químicas, designadamente o aparecimento de grupos funcionais relacionados com oxidação (sulfóxidos e ésteres) e a transformação dos hidrocarbonetos cíclicos em resinas, que em seguida se transformam em asfaltenos (Peralta, 2013).

Os principais mecanismos relacionados com o envelhecimento do betume são a oxidação, a evaporação, a exsudação e o endurecimento físico. A oxidação está relacionada com a reação do betume com o oxigénio, tratando-se de um processo impulsionado por elevadas temperaturas e energias de radiação. Por sua vez, a evaporação refere-se à perda dos compostos voláteis dos betumes devido à exposição a elevadas temperaturas. A exsudação resulta da perda dos compostos oleosos que exsudam do betume para os agregados. Por último, o endurecimento físico que pode ocorrer por um longo período de tempo e deve-se ao grau de estruturação molecular, sendo igualmente influenciado pela temperatura (Karlsson e Isacsson, 2006).

De acordo com DeDene *et al.* (2014), uma forma de minimizar o problema do envelhecimento é adicionando um agente regenerador, ou aditivo químico, cujo objetivo é restaurar/repor a consistência inicial do betume. Existem dois tipos de aditivos químicos, nomeadamente os agentes rejuvenescedores e os agentes de amolecimento. Os primeiros restauram as propriedades químicas do betume recuperado, enquanto os segundos reduzem a viscosidade do betume recuperado.

O rejuvenescimento do betume é um processo usado para reciclar materiais rodoviários e consiste em tentar recuperar as propriedades iniciais do betume envelhecido, através da adição de pequenas quantidades de rejuvenescedor (e.g., óleo de motor). O principal objetivo é que o rejuvenescedor dilua os asfaltenos provenientes do envelhecimento do betume ao adicionar maltenos (fração volátil do betume) (Jia *et al.*, 2014, Lesueur, 2009). Como tal, o óleo pode ser utilizado na reciclagem de pavimentos, no processo de reabilitação ou substituição de camadas de pavimento danificadas (Reyes-Ortiz *et al.*, 2012).

Os rejuvenescedores devem ter a capacidade de cobrir o material novo e o material fresado, dispersar facilmente no betume recuperado e formar uma mistura homogénea (Kamaruddin *et al.*, 2014). Vários estudos sugerem o uso de diferentes tipos de rejuvenescedores, como betumes de elevada penetração, óleos vegetais (Dony *et al.*, 2013, Zoorob *et al.*, 2018), óleos de diluição (Karlsson e Isacsson, 2006) e óleo de motor usado (Romera *et al.*, 2006, Silva *et al.*, 2012).

No estudo dos autores Zargar *et al.* (2012), estes referem a possibilidade de utilizar óleo de cozinha usado como rejuvenescedor do betume envelhecido, porque este resíduo é de difícil reciclagem e a sua colocação em aterros pode contaminar os terrenos e as linhas de água. O estudo desses autores surgiu depois de os mesmos terem verificado que outro tipo de óleo (óleo de motor usado) apresentava

resultados bastante significativos no rejuvenescimento do betume. Apesar do óleo de cozinha rejuvenescer o betume envelhecido, no referido estudo este não atingiu as propriedades típicas de um betume convencional. Outros autores, tais como Asli *et al.* (2012) e Chen *et al.* (2014) também têm vindo a estudar a possibilidade de rejuvenescer o betume recuperado com óleo vegetal, mas ainda existem alguns fatores que condicionam a sua utilização.

No caso dos óleos de diluição, ou óleos aromáticos, estes são tradicionalmente usados nas borrachas naturais e nos pneus pois apresentam elevada compatibilidade com a maioria dos elastómeros sintéticos e naturais (Dasgupta *et al.*, 2007). Devido a este excelente comportamento com a borracha e pelo seu reduzido preço, os óleos de diluição são usados para rejuvenescer o betume envelhecido, mas também são usados em misturas betuminosas com betume borracha (Dasgupta *et al.*, 2007, Karlsson e Isacson, 2006).

Outros autores referem ainda a utilização de bio-ligantes que, para além de serem usados como modificadores de betumes, permitiram desenvolver ligantes alternativos com comportamento igual ou superior aos betumes convencionais (Peralta *et al.*, 2013). Estes ligantes alternativos são constituídos por bio-óleo (proveniente da pirólise de matéria orgânica) juntamente com borracha de pneus usados, uma vez que o bio-óleo por si só, apesar de apresentar características reológicas semelhantes ao betume convencional a temperaturas elevadas e intermédias, a baixas temperaturas tem um comportamento muito rígido e vítreo (Peralta, 2013).

Relativamente ao óleo de motor usado, segundo Romera *et al.* (2006) este reduz a temperatura de produção e compactação das misturas betuminosas, para além de se tratar de um resíduo e, como tal, apresenta benefícios, quer a nível ambiental, quer a nível económico. A adição de óleo usado de motor no betume envelhecido aumenta a sua penetração e diminui o ponto de amolecimento. Para além disso, reduz a viscosidade a elevadas temperaturas, como tal, a resistência à compactação é menor e, consequentemente há uma melhoria da trabalhabilidade, garantindo-se assim uma redução da porosidade das misturas (Silva *et al.*, 2012). Todavia, a introdução do óleo de motor usado pode reduzir a recuperação elástica e a resistência à deformação permanente, bem como aumentar a presença de carbonilos tipicamente relacionada com o processo de envelhecimento do betume (Jia *et al.*, 2014).

Segundo Decreto-Lei n.º 73/2011 de 17 de Junho, os óleos usados são qualquer lubrificante, mineral ou sintético, ou óleos industriais que se tenham tornado impróprios para o uso a que estavam destinados.

Os óleos usados de motores de combustão e dos sistemas de transmissão, os óleos lubrificantes usados e os óleos usados para turbinas e sistemas hidráulicos são alguns exemplos de óleos usados. De acordo com Kamaruddin *et al.* (2014) o óleo de motor usado é um dos modificadores mais sustentáveis para melhorar o desempenho de um betume recuperado.

De acordo com Jia *et al.* (2014), o óleo de motor usado pode apresentar um valor muito superior para a indústria da pavimentação rodoviária, quando utilizado em misturas betuminosas como substituto parcial do betume, ou como rejuvenescedor, do que como combustível (valorização energética). Neste estudo, foram introduzidas diferentes percentagens de óleo de motor usado (2,5%, 5%, 7,5% e 10%) em dois betumes convencionais (PG 64-22 e PG 76-22) e a dois betumes compostos por 10% ou 30% de betume envelhecido (através do processo RTFOT e PAV) e 90 ou 70% de betume PG 64-22, respetivamente. Foram utilizadas estas percentagens de betume envelhecido para simularem as condições em central da utilização de material fresado (RAP). As principais conclusões deste estudo serão mencionadas em seguida.

Quimicamente, isto é, através da análise do espectro infravermelho (obtido através do ensaio de espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier) constatou-se que o óleo de motor usado apresenta grupos funcionais e estruturas moleculares similares ao betume convencional. Contudo, através de análises quantitativas, há indicação da presença de grupos funcionais de carbonilo, tipicamente relacionados com a oxidação do betume.

Para além disso, a introdução do óleo de motor usado reduziu em cerca de 6 °C (para percentagens de óleo de motor usado de 5%) e 12 °C (para percentagens de óleo de motor usado de 10%) a temperatura mais elevada do grau PG, dependendo do tipo de betume utilizado. Este resultado vem de encontro à utilização do óleo de motor usado como rejuvenescedor ou óleo de diluição, isto é, para reduzir a viscosidade e repor o comportamento inicial do betume envelhecido.

Contudo, a sua utilização compromete a capacidade resiliente do betume o que leva ao decréscimo da resistência à deformação permanente, também verificada noutros estudos. Para além disso reduz a rigidez do betume a baixas temperaturas o que pode ser um bom indicador para a resistência ao fendilhamento. Deste modo, e de acordo com os autores mencionados, a introdução de óleo de motor usado no betume deve no geral ser evitada uma vez que apresenta efeitos negativos no desempenho do

betume convencional. Contudo se a sua adição for mesmo necessária deve ser numa quantidade limitada.

Desta forma, a utilização de óleo de motor usado como modificador ou substituto parcial do betume, e não apenas como rejuvenescedor, também poderá apresentar vantagens semelhantes às obtidas pelos autores anteriormente mencionados. Quando utilizado em conjugação com polímeros (plastómeros ou elastómeros) poderão ser minimizados os problemas de deformação permanente que ocorrem nos betumes substituídos parcialmente por óleo de motor usado. Desta conjugação poderá surgir um inovador betume modificado e, como tal, um produto alternativo para utilização na pavimentação rodoviária.

O fundo de coluna de destilação, também conhecido na literatura como *Re-refined Engine Oil Bottoms* (REOB), é normalmente utilizado como agente de amolecimento, reduzindo as temperaturas do grau PG (quer a mais elevada, quer a mais baixa). Este material tem um elevado interesse principalmente em países com clima frio onde é crucial reduzir o fendilhamento a temperaturas baixas, mas também para dar resposta à tendência de utilizar elevadas quantidades de material fresado (Institute, 2016, Li *et al.*, 2017).

O fundo de coluna é um resíduo não destilável proveniente da reciclagem do óleo de motor usado por destilação atmosférica seguida de destilação a vácuo. Segundo o US Department of Energy e Office of Fossil Energy (2016) estima-se que da totalidade de óleo de motor usado recolhido nos Estados Unidos da América, 83% é usado como combustível e 17% é reciclado. Durante esse processo de reciclagem são produzidos 75% de óleo reciclado, 12% de óleo combustível e 12% é resíduo, ou seja, fundo de coluna, que é utilizado como produto para a modificação de betumes.

Este processo de regeneração do óleo de motor usado é composto por três etapas, sendo elas: i) extração por vapor para retirar os componentes voláteis; ii) destilação a vácuo a temperatura moderada usada para remover combustíveis leves; e, iii) destilação a vácuo a elevadas temperaturas cujo objetivo é separar os óleos lubrificantes do resíduo final. Durante este processo, algumas das maiores partículas de metal contidas no óleo de motor usado são removidas (D'Angelo *et al.*, 2012, Institute, 2016).

De acordo com Paliukaite *et al.* (2016) este material é extremamente usado como aditivo nos Estados Unidos e no Canadá devido ao seu baixo custo e à sua crescente disponibilidade ao longo dos anos. O

fundo de coluna é vendido com descontos significativos aos produtores de betume que desta forma conseguem aumentar a sua margem de lucros.

Contudo, trata-se de um produto cuja utilização na modificação de betumes não é consensual. Alguns estudos apresentam vantagens, enquanto outros referem vários problemas que poderão estar relacionados com a sua utilização.

No estudo de D'Angelo *et al.* (2012), as frações SARA de dois fundos de coluna analisados mostram que o material é constituído por cerca de 50% de resinas e saturados, não apresentando aromáticos na sua constituição, assim como um reduzido valor de asfaltenos (2,6% ou 6,6%). Os saturados ajudam à dispersão dos asfaltenos, reduzindo as associações que causam o envelhecimento do betume e reduzem as propriedades do betume a temperaturas baixas e intermédias. O mesmo autor refere ainda que a presença de ceras nos fundos de coluna analisados é inferior a 0,32%, ou seja, não é provável que este material possa aumentar o envelhecimento do betume (a presença de ceras ou materiais alifáticos são conhecidos por cristalizar ao longo do tempo causando fendilhamento).

A adição de fundo de coluna no betume reduz as temperaturas do grau PG em cerca de 8 °C a 10 °C. Para além disso, a taxa de envelhecimento do betume modificado com fundo de coluna até com percentagens superiores a 20% não sofreu alterações comparativamente ao betume base. Estes resultados foram também verificados na análise da fração SARA das amostras de betume modificado com fundo de coluna após envelhecimento, uma vez que a taxa de crescimento de asfaltenos não aumentou comparativamente à taxa de crescimento do betume base (D'Angelo *et al.*, 2012).

Importa ainda salientar que os betumes modificados com fundo de coluna são estáveis ao armazenamento, não existindo separação dos dois materiais (betume/fundo de coluna) e que este não afetou negativamente a capacidade de adesão do betume aos agregados, apesar de se tratar de um residuo proveniente de um material lubrificante (D'Angelo *et al.*, 2012).

Relativamente às propriedades mecânicas das misturas betuminosas com fundo de coluna verifica-se que estas apresentam uma resistência à deformação permanente, resistência à fadiga e à ação da água iguais ou até melhores que as das misturas com características semelhantes produzidas com betumes convencionais (D'Angelo *et al.*, 2013). De acordo os mesmos os betumes modificados com fundo de coluna deverão apresentar um bom desempenho quando aplicados nos pavimentos. Wielinski *et al.*

(2015) também referem que a modificação com 9% de fundo de coluna não afeta negativamente a rigidez da mistura nem a sua resistência à ação da água.

Por sua vez, Mogawer *et al.* (2017) refere que o sistema de classificação de betumes através do grau PG não tem em conta o tipo de modificador, desde que o betume resultante cumpra determinados valores da classificação. Este facto faz com que seja permitido diferentes formas de modificação, aumentando a competitividade entre fornecedores e a criação de novos e melhores produtos. Contudo, as entidades rodoviárias preocupam-se que estes modificadores possam comprometer o desempenho das misturas, nomeadamente a sensibilidade à água e o fendilhamento. Outras preocupações inerentes do uso de resíduos estão relacionadas com o facto de serem ou não amigos do ambiente, recicláveis e seguros para os trabalhadores que os irão utilizar.

Todavia, de acordo com Hesp e Shurvell (2010) e Rubab *et al.* (2011) os betumes modificados com fundo de coluna apresentam excessivo envelhecimento que podem causar danos prematuros e demasiado fendilhamento nos pavimentos. Segundo Li *et al.* (2017), para além do excessivo envelhecimento, as misturas com fundo de coluna exibem baixa resistência à água se não se utilizar aditivos para aumentar a aderência. Para além disso, o mesmo autor refere resultados à fadiga mistos, isto é, o impacto do fundo de coluna no desempenho à fadiga a temperaturas intermédias depende das condições de envelhecimento e do tipo de ensaio realizado (em controlo de tensão ou em controlo de extensão). Em condições de controlo de extensão o aumento de fundo de coluna diminui a resistência à fadiga, mas relativamente ao envelhecimento esta tendência inverte-se.

Deste modo verifica-se que os efeitos do fundo de coluna, quer no betume, quer nas propriedades das misturas são inconsistentes e não completamente compreensíveis. No entanto, se a sua utilização não se limitar à redução da viscosidade de um betume convencional, este pode ser utilizado juntamente com polímeros como substituto parcial do betume. A introdução dos polímeros poderá mitigar alguns dos problemas mencionados em alguns estudos e, até mesmo atingir resultados superiores aos que outros autores já atingiram quando o utilizaram isoladamente. De salientar que a questão de ser amigo do ambiente e seguro no seu manuseamento será ser avaliado neste estudo de modo a dar resposta aos receios das entidades competentes.

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

3.1. Introdução

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de betumes inovadores que maximizem a utilização de resíduos e reduzam a quantidade de betume convencional aplicado, para produção de misturas sustentáveis convencionais (sem material fresado) ou recicladas, e que não comprometam o seu desempenho. Para concretizar esse objetivo, diferentes materiais foram utilizados e caracterizados neste estudo, tal como será explanado ao longo deste capítulo.

Durante este estudo foi avaliada a utilização de dois resíduos para substituição parcial do betume, nomeadamente óleo de motor usado (O) e fundo de coluna (F). O óleo de motor usado não foi sujeito a nenhum tratamento e foi fornecido por uma empresa de recolha certificada (SOGILUB). Por sua vez, a partir do processo de regeneração do óleo de motor usado (destilação em coluna) é gerado outro resíduo denominado fundo de coluna, que basicamente é constituído pelos compostos pesados do óleo de motor usado, ou seja, é o material que fica no fundo da coluna de destilação. Este material é um óleo de elevada viscosidade, uma vez que grande parte dos compostos voláteis foi removida durante o processo de regeneração ou destilação do óleo de motor usado. Este material também foi fornecido pela empresa responsável pela recolha e tratamento de óleo de motor usado em Portugal, a SOGILUB.

O betume base utilizado neste estudo, para modificação ou substituição parcial com resíduos, foi um betume convencional com uma penetração compreendida entre 35 e 50 décimas de milímetro (de acordo com a norma EN 125919), fornecido pela CEPSA Portugal, e foi escolhido por ser um dos betumes mais utilizados atualmente em Portugal. De salientar que todos os betumes modificados com resíduos, quer para misturas sem material fresado, quer para misturas recicladas, foram produzidos a partir do mesmo betume base (B35/50), de modo a que as variáveis em análise fossem apenas as quantidades e o tipo de modificadores a adicionar.

O betume convencional B35/50, assim como um betume modificado comercial denominado PMB45/80-60 (de acordo com a norma EN 14023), também foram usados para efeitos de comparação com os betumes inovadores desenvolvidos para misturas sem material fresado. Por último, utilizou-se um betume B160/220 para efeitos de comparação com os mesmos betumes, mas para utilização em misturas recicladas. Os betumes PMB45/80-60 e B160/220 também foram facultados pela CEPSA

Portugal. Importa salientar que a caracterização destes materiais será realizada simultaneamente com os novos betumes modificados para uma melhor comparação de resultados.

Três polímeros diferentes foram também usados neste estudo com o principal objetivo de melhorar as propriedades dos betumes modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e, ao mesmo tempo, maximizar a utilização de resíduos (visto dois deles serem resíduos provenientes de outras indústrias). Os polímeros utilizados foram os seguintes: i) um resíduo plástico de polietileno de alta densidade (HDPE); ii) granulado de borracha (CR) proveniente de pneus usados; e, iii) um dos polímeros virgens mais utilizados e conhecidos na modificação de betumes, o estireno-butadieno-estireno (SBS). O HDPE foi facultado pela empresa Gintegral Gestão Ambiental, S.A., o SBS pela empresa Indústrias Invicta, S.A., enquanto a borracha foi facultada pela empresa Recipneu Lda.

Para a produção das misturas betuminosas, sem material fresado ou recicladas, foram selecionados agregados britados de origem granítica, com a exceção do filer em pó calcário, fornecidos pelas empresas Bezerras Lda. e Omya Comital S.A., respetivamente. Importa ainda referir que o tipo de mistura selecionada neste estudo denomina-se *Stone Mastic Asphalt* (SMA), cuja escolha resultou da intenção de salientar o efeito dos betumes desenvolvidos, uma vez que este tipo de mistura exige uma maior quantidade de betume, o que implica um maior impacto no desempenho das misturas finais e, consequentemente, uma maior avaliação dos reais efeitos dos mesmos. Como tal, produziram-se misturas sem material fresado e misturas recicladas do tipo SMA. Visto que estas misturas habitualmente utilizam maior percentagem de betume, foi necessário utilizar fibras acrílicas nas misturas de controlo convencional e reciclada, produzidas sem betumes modificados, para evitar o escorrimento do ligante. Todos estes materiais inertes serão descritos neste capítulo.

Por último, e para produção das misturas recicladas a estudar, também foi necessário utilizar material fresado. Esse material foi obtido através da fresagem de camadas de desgaste de uma autoestrada e, posteriormente, separado em duas frações (fina e grossa) com auxílio de um peneiro industrial de dimensão 8 mm. O material fresado foi fornecido pela empresa Elevo Group.

Deste modo, neste capítulo será feita a caracterização dos materiais a utilizar, nomeadamente os substitutos parciais do betume (óleo de motor usado e fundo de coluna), os polímeros, os agregados, filer e fibras a utilizar nas diversas misturas betuminosas estudadas, bem como o material fresado a incorporar nas misturas recicladas. A caracterização dos diferentes materiais a utilizar, nomeadamente

dos substitutos parciais do betume e os diferentes polímeros, é fundamental para compreender e prever o seu comportamento e as alterações que possam proporcionar quando incorporados no betume. Assim, em seguida será exposta a caracterização dos diferentes materiais referidos anteriormente.

3.2. Óleo de motor usado e fundo de coluna de destilação

O óleo de motor usado é um resíduo sujeito a recolha por parte de entidades competentes devido ao elevado risco de poluição dos solos, cursos e lençóis de água que este resíduo pode provocar. Durante o processo de recolha, alguns dos óleos não cumprem os requisitos legais (Sogilub, 2016) para serem recolhidos para tratamento (e.g. quantidade de cloro, água e sedimentos). No entanto, os que podem ser recolhidos são posteriormente tratados e valorizados através de regeneração, reciclagem ou valorização energética.

Os óleos usados recolhidos são essencialmente óleos de motor provenientes de veículos ligeiros e/ou veículos pesados. Como tal, considerou-se necessário avaliar se existem diferenças significativas entre o óleo de motor usado fornecido pela empresa e outros óleos de motor usados provenientes apenas de veículos ligeiros ou só de veículos pesados (que foram fornecidos posteriormente em menores quantidades e apenas para este estudo comparativo inicial).

No processo de regeneração dos óleos de motor usados em coluna de destilação gera-se um resíduo denominado fundo de coluna (Mogawer *et al.*, 2017). Este material é um óleo com maior viscosidade, ao qual foram retirados os compostos mais leves do óleo de motor usado, ficando apenas os compostos mais pesados. Devido a este processo de refinação, o fundo de coluna apresenta um risco maior de poluição devido à presença de metais pesados gerados no processo de combustão dos veículos ligeiros e/ou pesados e que ficam retidos neste material (Omari *et al.*, 2016). Este resíduo não tem atualmente qualquer tipo de utilidade (não é possível ser reciclado) e acarreta custos de deposição em aterro.

Desta forma, considerou-se importante avaliar estes resíduos térmica e quimicamente, avaliando assim possíveis libertações de compostos voláteis quando submetidos a temperaturas elevadas e a toxicidade do material. Nesse sentido, o óleo de motor usado e o fundo de coluna foram comparados com o betume convencional (B35/50), uma vez que é o material que eles irão substituir parcialmente neste estudo.

3.2.1. Viscosidade dinâmica

Os ensaios de viscosidade dinâmica foram realizados para avaliar o comportamento do óleo de motor usado e do fundo de coluna a temperaturas intermédias e elevadas, de modo a prever a influência que estes materiais terão na modificação do betume. Este ensaio permite ainda caracterizar reologicamente ambos os materiais. A viscosidade dinâmica foi determinada utilizando o viscosímetro *Brookfield*, de acordo com a norma EN 13302, numa gama de temperaturas entre 30 e 180 °C, com incrementos sucessivos de 10 °C. Para avaliar a mesma propriedade no betume convencional B35/50 na gama de temperaturas inferiores a 100 °C utilizou-se um reómetro dinâmico de corte (DSR), de acordo com a norma EN 14770. O betume base (B35/50) e os vários óleos fornecidos pela empresa SOGILUB foram avaliados para efeitos de comparação.

A variação da viscosidade dinâmica com a temperatura para os vários materiais analisados pode ser observada na Figura 3.1. Tal como seria de esperar, o óleo reciclado (obtido após destilação dos óleos usados) apresenta menor viscosidade em toda a gama de temperaturas estudada. Durante a vida útil do óleo de motor, este vai perdendo as suas propriedades originais, o que aumenta a sua viscosidade.

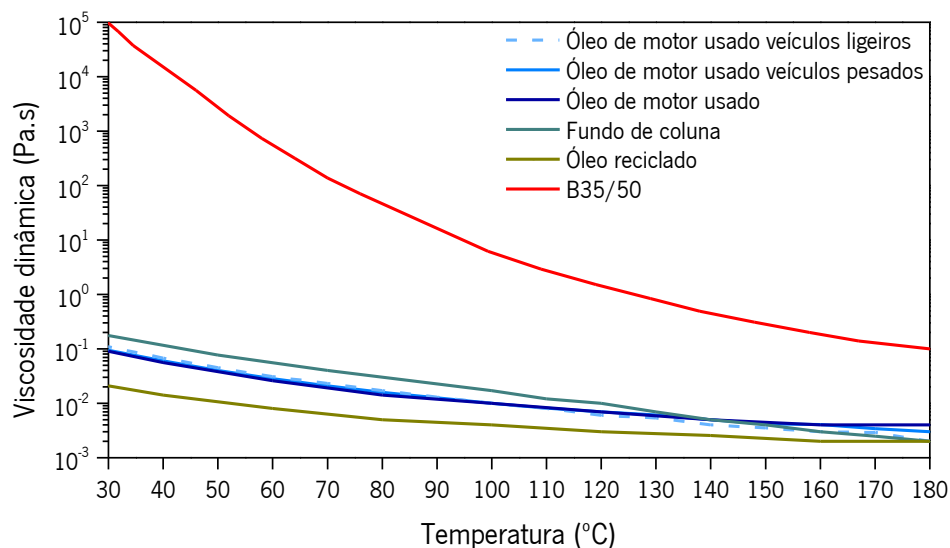


Figura 3.1. Comparação das viscosidades dos diferentes óleos em análise e do betume B35/50.

Os óleos de motor usados oriundos de veículos pesados ou ligeiros apresentam, ao longo do intervalo de temperaturas em estudo, viscosidades semelhantes. A principal diferença prende-se com a redução de viscosidade ser ligeiramente mais acentuada no óleo de motor usado proveniente de veículos ligeiros.

O óleo de motor usado (no seu conjunto, ou indiferenciado) exibe um comportamento muito semelhante ao óleo de motor usado proveniente de veículos pesados, apresentando uma redução de viscosidade ligeiramente menor na gama de temperaturas estudada. Em resumo, verifica-se que os vários óleos usados apresentam um comportamento reológico muito semelhante.

Relativamente ao fundo de coluna é possível verificar que este apresenta uma maior viscosidade do que os óleos de motor usados a temperaturas intermédias, como expectável devido à sua composição, embora apresente uma viscosidade inferior a temperaturas superiores a 150 °C. A maior viscosidade do fundo de coluna a temperaturas mais baixas, em comparação com o óleo de motor usado, poderá facilitar a sua utilização em maiores quantidades ao substituir parcialmente o betume (para atingir penetrações semelhantes). Por outro lado, a menor viscosidade do fundo de coluna a temperaturas elevadas pode contribuir para a redução das temperaturas de produção das misturas.

Para além disso, também foi possível confirmar que o óleo de motor usado e o fundo de coluna exibem viscosidades muito inferiores às do betume base B35/50 em toda a gama de temperaturas estudada. Assim, justifica-se claramente o uso destes resíduos como rejuvenescedores ou como óleos de diluição do betume B35/50 que se pretende substituir ou modificar com estes materiais.

Importa salientar que, quer o fundo de coluna, quer os óleos usados, não apresentam viscosidades superiores à recomendada para produção de misturas (ou seja, 0,3 Pa.s) em toda a gama de temperaturas ensaiada. O facto de estes apresentarem reduzidos valores de viscosidade permitirá reduzir a viscosidade do betume convencional e, para além disso, melhorar o processo de produção de misturas. Nesse sentido, o óleo de motor usado tornará o betume menos rígido na gama de temperaturas de serviço verificadas nos pavimentos, prevendo-se uma redução do módulo de rigidez e da resistência à deformação permanente, o que poderá ser compensado com a introdução de polímeros.

3.2.2. Propriedades térmicas

A análise termogravimétrica (TGA) permite obter a perda de massa destes materiais com o aumento da temperatura, de modo a avaliar a possibilidade de perda de compostos voláteis às temperaturas de produção do betume. O ensaio consiste em colocar uma amostra de pequena dimensão, com cerca de 7 a 10 mg de peso, num cadinho de platina, associado a uma balança de precisão que avalia a variação de peso da amostra durante o seu aquecimento. Essa amostra foi submetida a 4 etapas: i) temperatura

constante de 40 °C durante 1 minuto, de modo a garantir a homogeneização da temperatura em toda a amostra; ii) aquecimento até os 550 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min; iii) temperatura constante a 550 °C durante 1 minuto; e, iv) aquecimento até 700 °C a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. Estas fases do ensaio TGA garantem a análise de toda a decomposição térmica e perdas de massas típicas dos materiais analisados, ou seja, óleo de motor usado, fundo de coluna e betume base B35/50. Importa salientar que a taxa de aquecimento é a referida uma vez que o equipamento se encontra calibrado para a mesma. Para além disso, o ensaio foi realizado num ambiente controlado com azoto, cujo caudal foi de 60 ml/min, de modo a evitar interferências nas medições realizadas. De salientar que as etapas idealizadas foram baseadas num estudo de Bredin *et al.* (2011).

De acordo com esse estudo de Bredin *et al.* (2011), os óleos de motor usado normalmente exibem quatro fases de perdas de massa. A primeira ocorre a uma temperatura inferior a 200 °C e pode estar relacionada com a presença de água ou com a perda de compostos altamente voláteis. Os restantes compostos voláteis são responsáveis pela perda de massa que ocorre no intervalo de temperaturas compreendido entre os 200 e os 700 °C (referente à segunda fase). A terceira e quarta fase estão relacionadas com a perda da matéria combustível (compostos não voláteis mas oxidáveis) e com a massa resultante desse processo (material não oxidável), respetivamente, após a troca para uma atmosfera oxidável (e.g. oxigénio). Importa salientar que a melhor forma de identificar a existência destas fases consiste em traçar a derivada da perda de massa (DTG) das amostras e avaliar a ocorrência de picos em determinadas gamas de temperaturas.

Assim, no óleo de motor usado e fundo de coluna podem ser identificadas duas perdas de massa, visíveis pelos picos nas respetivas curvas de DTG, na gama de temperaturas correspondentes à perda de compostos voláteis Figura 3.2. No caso do óleo de motor essas perdas de massa são de 91% e 7%, enquanto no fundo de coluna essa perda de massa é de 89% e 9% e ocorre a temperaturas ligeiramente mais altas do que no óleo de motor usado (devido à presença de componentes menos voláteis no fundo de coluna). A perda de massa de ambos os materiais termina à temperatura de aproximadamente 500 °C, o que está de acordo com o que refere Uçar *et al.* (2016).

De acordo com Fang *et al.* (2014), os betumes apresentam normalmente três fases principais de perda de massa: i) volatilização dos compostos voláteis (entre os 220 e os 370 °C); ii) decomposição dos asfaltenos e resinas (compreendido entre os 380 e 500 °C); e, iii) decomposição térmica dos asfaltenos (aproximadamente aos 550 °C). Tal como se pode observar na curva DTG do betume B35/50 utilizado,

o mesmo apresenta duas fases de perdas de massa de 14% e 72% relacionadas com as duas primeiras fases anteriormente mencionadas, nomeadamente, perda de compostos leves e decomposição dos asfaltenos e resinas. Neste caso, acima de 550 °C não há evidência de nenhum pico na curva DTG, uma vez que não se utilizou uma atmosfera oxidável.

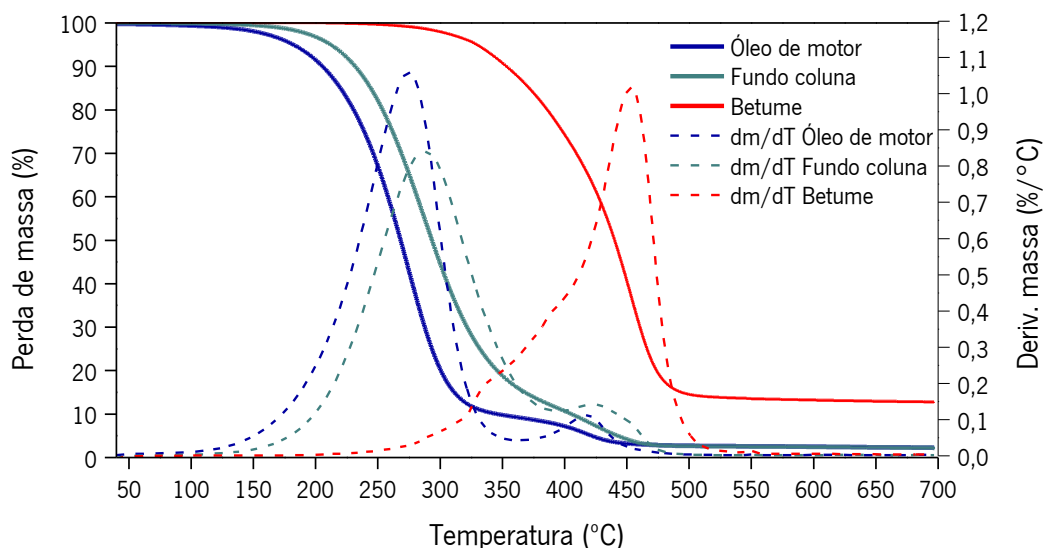


Figura 3.2. Curvas termogravimétricas do óleo de motor usado, fundo de coluna e betume B35/50.

Para além disso, verifica-se que o início da perda de massa do óleo de motor usado e do fundo de coluna ocorre às temperaturas de cerca de 90 °C e 150 °C, respetivamente, enquanto no betume B35/50 a perda de massa tem início a cerca de 260 °C. Deste modo, tal como esperado, o betume convencional é termicamente mais estável do que o fundo e coluna e o óleo de motor usado, dado que a decomposição do material inicia-se a uma temperatura superior. Ainda é possível observar que o óleo de motor exibe uma perda de massa de 0,5% até os 100 °C que pode ser relacionada com a presença de água.

Por ser um dos principais objetivos desta análise TGA, importa salientar que na gama de temperaturas de produção dos betumes modificados (170 a 180 °C) e das misturas betuminosas correspondentes, as perdas de massa do óleo de motor usado e do fundo de coluna são de apenas 4% e 1%, respetivamente. Aliado às perdas de massa reduzidas, a perda de massa máxima do óleo de motor e do fundo de coluna nessa fase surge às temperaturas de 275 e 287 °C, respetivamente, que são bastante superiores à gama de temperaturas de produção, garantindo a necessária segurança para sua aplicação.

Outra análise térmica realizada neste estudo, e que se baseou na norma EN 22592, foi a determinação da temperatura de inflamação. O ensaio de determinação da temperatura de inflamação, ou ponto de

inflamação, consiste em recolher uma amostra do material a ensaiar para um recipiente especificado. Em seguida, a amostra é submetida a uma taxa de aquecimento constante, rápida numa primeira fase do ensaio, e depois mais lenta à medida que o ponto de inflamação se aproxima. A temperatura mais baixa a que a passagem de uma chama sobre a superfície da amostra, em condições normalizadas, causa a ignição do vapor libertado pela mesma, é denominado ponto de inflamação (*flash point*, na terminologia anglo-saxónica). Caso se pretenda determinar o ponto/temperatura de combustão, o ensaio deve continuar até que a chama do ensaio cause a ignição e a amostra arda durante 5 segundos.

No caso do óleo de motor usado e do fundo de coluna a temperatura a que ocorre a inflamação dos mesmos é de 200 e 252 °C, respetivamente. No caso do betume B35/50 a temperatura de inflamação é de 362 °C, claramente superior à do óleo de motor usado e do fundo de coluna. Apesar do óleo de motor apresentar uma baixa temperatura de inflamação, este nunca deverá estar sujeito a uma chama durante todo o processo de produção do betume modificado. Na mesma medida, como esse material é usado apenas como substituto parcial do betume, a temperatura de inflamação do conjunto betume/óleo de motor usado será claramente superior à do óleo de motor usado *per si*. Assim, estes resultados evidenciam que as soluções desenvolvidas neste trabalho podem ser utilizadas com segurança a nível industrial, embora também fique patente que há um maior risco do que nas misturas convencionais.

3.2.3. Propriedades químicas

A espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) é uma ferramenta muito útil para a análise das macromoléculas dos materiais, pois permite identificar os seus diferentes compostos químicos orgânicos (DeDene *et al.*, 2014, Jia *et al.*, 2014). Esta análise baseia-se no princípio de que a vibração das moléculas a frequências específicas afetam a absorvância do espectro infravermelho e, deste modo, os grupos funcionais podem ser identificados (Jia *et al.*, 2014).

Para realizar a análise FTIR, e dado que o óleo reciclado, os óleos usados e o fundo de coluna resultam de resíduos e podem conter água, é necessário retirá-la colocando a amostra numa estufa a vácuo. Em seguida, a amostra a ensaiar é colocada em lamelas de brometo de potássio. No caso do betume B35/50, as amostras foram preparadas dissolvendo o betume em clorofórmio numa concentração de 10% em peso. Após dissolução, colocou-se uma gota dessa mistura entre duas lamelas de brometo de potássio e esperou-se que o solvente evaporasse de modo a realizar o ensaio. O equipamento utilizado

foi o FTIR *Jasco*, numa gama de números de onda entre os 4000 cm^{-1} e os 500 cm^{-1} , com 32 varrimentos.

Os principais números de onda que tipicamente caracterizam os betumes e o óleo de motor usado são apresentados no Quadro 3.1. A informação aí apresentada permite analisar os vários materiais em estudo, incluindo os vários tipos de óleo e betumes utilizados.

Quadro 3.1. Compostos e grupos funcionais típicos de betumes e óleo de motor usado que podem ser identificados no ensaio FTIR (adaptado de DeDene *et al.*, 2014 e Jia *et al.*, 2014).

Número de onda (cm^{-1})	Nome do composto	Grupo Funcional	Vibração Molecular
2850 - 3000	Hidrocarbonetos saturados	C-H	estiramento
1700	Carbonilo	C=O	estiramento
1600	Aromáticos	C=C	estiramento
1460	Hidrocarbonetos aromáticos	C-H de $(\text{CH}_2)_n$	flexão
1375		C-H de (CH_3)	
1030	Sulfóxido	S=O	estiramento
650 - 910	Alcanos	C-H	flexão

A partir dos compostos e grupos funcionais contemplados no Quadro 3.1, bem como do espectro FTIR do betume base B35/50 apresentado na Figura 3.3a, é possível verificar que este apresenta os picos principais nos números de onda 2922 e 2850 cm^{-1} , correspondentes ao estiramento C-H dos compostos hidrocarbonetos saturados e nos números de onda 1436 e 1373 cm^{-1} relacionados com a flexão das ligações CH_2 e CH_3 dos compostos hidrocarbonetos aromáticos. Adicionalmente, o betume apresenta vários picos na gama de números de onda compreendidos entre 910 e 650 cm^{-1} , referentes à flexão da ligação C-H dos compostos alcanos e um pico no número de onda 1598 cm^{-1} relacionado com a ligação dupla de carbono (aromáticos).

Por sua vez, o óleo reciclado (Figura 3.3b) apresenta estiramento C-H dos compostos hidrocarbonetos saturados nos números de onda 2954 cm^{-1} , 2925 cm^{-1} e 2854 cm^{-1} , flexão das ligações CH_2 e CH_3 correspondentes aos compostos hidrocarbonetos aromáticos nos números de onda 1464 cm^{-1} e 1377 cm^{-1} e, por último, flexão da ligação C-H dos compostos alcanos no número de onda 723 cm^{-1} . A principal diferença relativamente ao betume base B35/50 prende-se com a inexistência de picos de

sulfóxido e aromáticos no óleo de motor reciclado. No essencial, os principais grupos funcionais de ambos os materiais são iguais, uma vez que a sua origem é a mesma (destilação do petróleo). Como tal, a sua composição química é muito semelhante, o que facilita a sua compatibilidade.

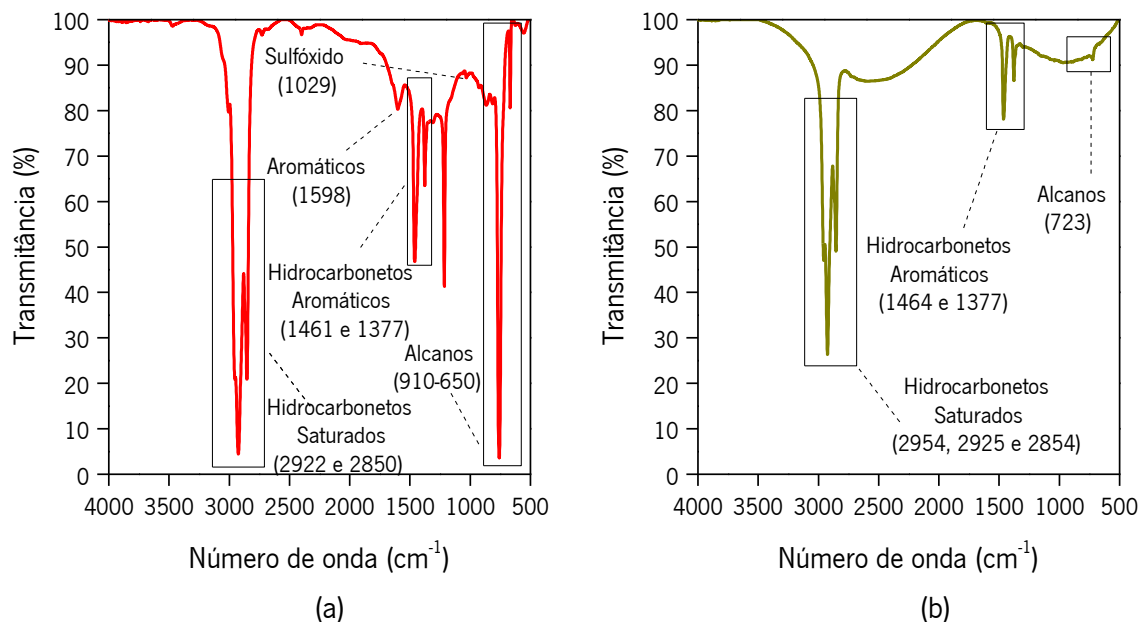


Figura 3.3. Espectros FTIR do (a) betume B35/50 e do (b) óleo de motor reciclado.

O mesmo tipo de grupos funcionais e compostos verificados no espectro do óleo de motor reciclado e do betume convencional, nomeadamente hidrocarbonetos aromáticos, hidrocarbonetos saturados e alcanos, podem ser observados nos espectros da Figura 3.4 (óleos de veículos ligeiros e pesados) e da Figura 3.5 (óleo de motor e fundo de coluna), porque estes materiais têm a mesma origem.

Quando comparados com o óleo reciclado, a principal diferença dos óleos de motor usados provenientes de veículos pesados ou de veículos ligeiros prende-se com a presença de picos de transmitância nos números de onda 1697 cm^{-1} , e 1604 cm^{-1} ou 1594 cm^{-1} , os quais correspondem, respetivamente, aos estiramentos das ligações de $\text{C}=\text{O}$ (carbonilo) e de $\text{C}=\text{C}$ (aromáticos). Importa salientar que apenas o óleo de motor proveniente de veículos pesados apresenta o pico carbonilo ($\text{C}=\text{O}$). De acordo com DeDene *et al.* (2014) os picos relativos ao sulfóxido ($\text{S}=\text{O}$) e carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) permitem avaliar o envelhecimento dos betumes, incluindo os betumes que incorporam óleo de motor usado. Desta forma, a não presença de carbonilo no óleo de motor usado proveniente de veículos ligeiros poderá indicar que este não se encontra tão envelhecido como o óleo de motor usado de veículos pesados.

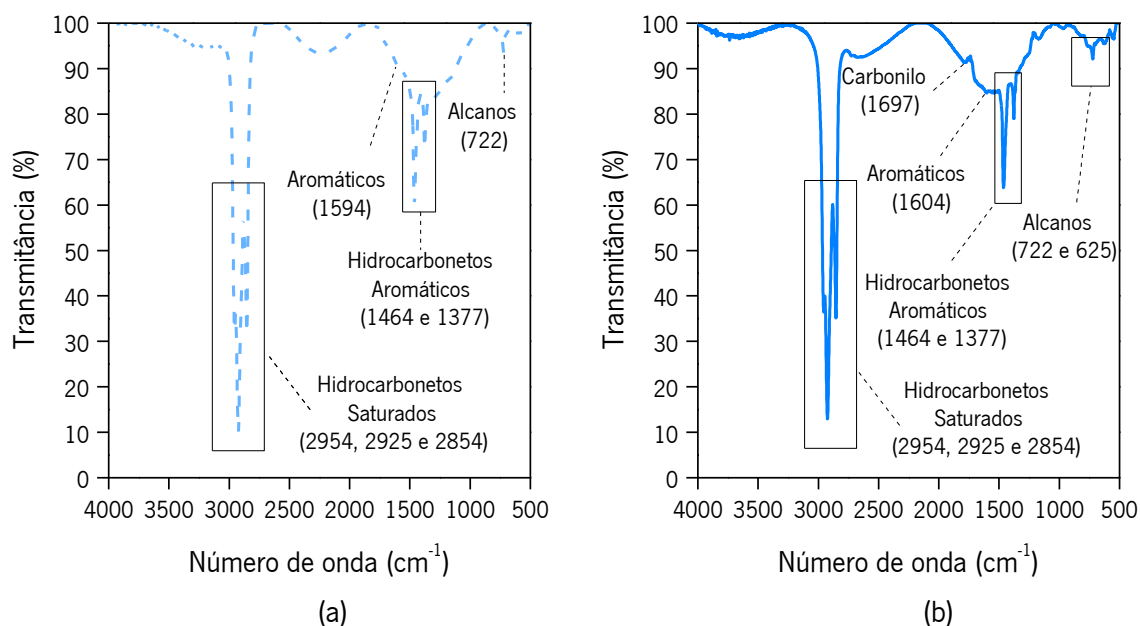


Figura 3.4. Espectros FTIR do óleo de motor usado de (a) veículos ligeiros e de (b) veículos pesados.

Os espectros FTIR do óleo de motor usado e do fundo de coluna utilizados neste estudo, provenientes da empresa de recolha de óleos SOGILUB, podem ser observados na Figura 3.5. O óleo de motor usado em análise, que é composto por uma mistura de óleo de veículos pesados e ligeiros, tem um espectro mais próximo do apresentado para o óleo de motor usado proveniente de veículos pesados. Por sua vez, o fundo de coluna exibe um pico de transmitância no número de onda 1030 cm^{-1} , correspondente ao estiramento das ligações S=O (sulfóxido), para além dos picos mencionados anteriormente.

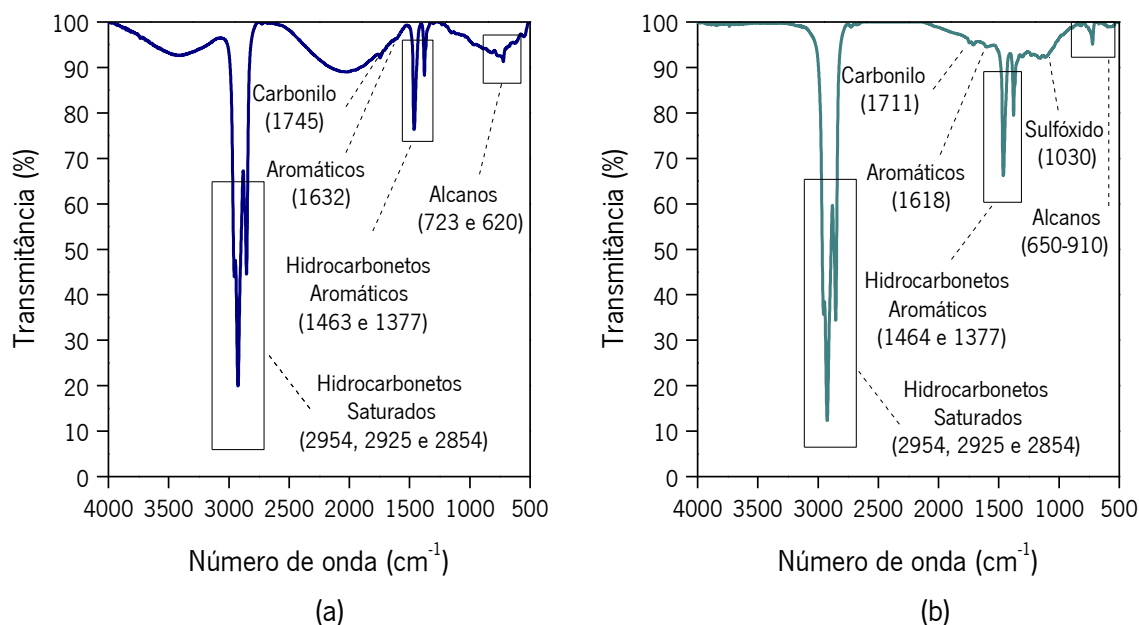


Figura 3.5. Espectros FTIR do (a) óleo de motor usado e do (b) fundo de coluna.

Deste modo, pode constatar-se que o fundo de coluna apresenta uma composição química semelhante ao óleo de motor usado e ao betume convencional, mas encontra-se mais envelhecido quimicamente devido à presença simultânea de carbonilos e sulfóxidos (típicos de materiais mais envelhecidos).

Tendo em consideração a análise anteriormente efetuada, os óleos que serão avaliados na restante caracterização e na modificação dos betumes serão apenas o óleo de motor usado e o fundo de coluna. De facto, o óleo de motor usado apresenta reduzidas diferenças em relação aos óleos provenientes de veículos ligeiros ou pesados, sendo difícil obter esses materiais de forma separada. O fundo de coluna, ao ter uma viscosidade ligeiramente mais alta, será menos suscetível à variação da temperatura.

Assim, ao utilizar óleo de motor usado e fundo de coluna garante-se que as condições de produção serão mais fáceis de implementar (maior facilidade de obtenção desses resíduos), e estudam-se materiais com maior potencial de valorização (devido ao seu maior envelhecimento e grau de contaminação).

3.2.4. Presença de metais pesados e outros contaminantes

A análise de metais pesados e outros contaminantes por Espectroscopia de Emissão Atómica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP), de acordo com a norma D5185-09, foi realizada num laboratório externo denominado *AGAT laboratories*. Este ensaio permite identificar e quantificar a presença de metais pesados e outros contaminantes num dado material e, consequentemente a sua eventual toxicidade. Tal como se pode visualizar na Quadro 3.2, o betume base que será usado na modificação (B35/50), o óleo de motor usado e o fundo de coluna foram analisados neste ensaio quanto à presença de vários metais pesados e outros contaminantes.

O betume convencional, para a maioria dos metais pesados e outros contaminantes referidos, apresenta a menor concentração comparativamente ao óleo de motor usado e ao fundo de coluna, com a exceção do arsénio (As), níquel (Ni), selénio (Se), silício (Si) e estanho (Sn).

Para além disso, o fundo de coluna é o material que apresenta a maior concentração da maioria dos metais pesados e contaminantes analisados. A elevada concentração de ferro (Fe) no óleo de motor usado e no fundo de coluna pode estar relacionado com o facto deste metal pesado ser um elemento base do aço presente em muitos componentes lubrificados dos veículos e/ou devido à oxidação dos mesmos (presença de ferrugem).

Quadro 3.2. Análise dos metais pesados e contaminantes do betume convencional, óleo de motor usado e fundo de coluna.

Metais pesados/ contaminantes	Unidades	B35/50	Óleo de motor usado	Fundo de coluna
Prata (Ag)	ppm	0	0	0
Alumínio (Al)	ppm	9	15	37
Arsénio (As)	ppm	2	0	0
Boro (B)	ppm	0	76	40
Bário (Ba)	ppm	4	8	10
Berílio (Be)	ppm	0	0	0
Cálcio (Ca)	ppm	120	1850	4410
Cádmio (Cd)	ppm	0	0	0
Cobalto (Co)	ppm	1	1	1
Crómio (Cr)	ppm	2	3	7
Cobre (Cu)	ppm	1	24	25
Ferro (Fe)	ppm	60	120	317
Mercúrio (Hg)	ppm	0	0	0
Potássio (K)	ppm	8	69	203
Magnésio (Mg)	ppm	16	67	207
Manganês (Mn)	ppm	1	4	9
Molibdénio (Mo)	ppm	0	21	28
Sódio (Na)	ppm	58	70	254
Níquel (Ni)	ppm	120	2	2
Fósforo (P)	ppm	20	887	2000
Chumbo (Pb)	ppm	4	10	11
Antimónio (Sb)	ppm	1	2	1
Selénio (Se)	ppm	9	0	0
Silício (Si)	ppm	52	47	38
Estanho (Sn)	ppm	7	2	4
Titânio (Ti)	ppm	1	1	1
Vanádio (V)	ppm	2	1	2
Zinco (Zn)	ppm	35	960	995
Zircónio (Zr)	ppm	0	0	0

Por sua vez, a elevada concentração de potássio (K) e sódio (Na) pode estar associada à presença de líquidos refrigeradores e poeiras, tal como também confirmou o estudo de Wielinski *et al.* (2015). Importa ainda salientar que a concentração de metais pesados e contaminantes apresentados no Quadro 3.2 são claramente inferiores à concentração de metais pesados dos diferentes fundos de coluna avaliados no estudo de D'Angelo *et al.* (2012). Ou seja, o fundo de coluna utilizado neste estudo tem menor risco de toxicidade do que outros materiais equivalentes utilizados na pavimentação rodoviária a nível mundial, tais como óleo de diluição.

De acordo com Rauckyte *et al.* (2006), o óleo de motor usado para valorização energética deve cumprir certos limites máximos quanto à presença de metais pesados, nomeadamente 5 ppm para o arsénio (As), 2 ppm para cádmio (Cd), 10 ppm para crómio (Cr) e 100 ppm para o chumbo (Pb). Tal como se pode verificar, o óleo de motor usado em estudo, assim como o betume e o fundo de coluna, apresentam valores inferiores aos limites previamente mencionados. Os mesmos autores referem estudos anteriores onde as concentrações de metais pesados e contaminantes são similares às obtidas neste estudo para o óleo de motor e fundo de coluna, e que não limitaram a possibilidade de utilizar estes materiais.

Contudo, é importante salientar que apesar da concentração de metais pesados e outros contaminantes no óleo de motor e no fundo de coluna apresentarem semelhanças com outros estudos e, ao mesmo tempo, cumprir os limites impostos para a recuperação energética dos mesmos, estes não devem ser depositados em aterros para materiais inertes sob risco de poderem contaminar lençóis freáticos ou cursos de água. De facto, estes devem ser recolhidos e tratados por entidades competentes, para depois poderem ser valorizados em novos produtos que não sejam tóxicos, tais como os desenvolvidos neste trabalho.

3.3. Polímeros

A utilização de polímeros na modificação de betumes tem como principal objetivo melhorar as propriedades do betume e, consequentemente, das misturas betuminosas. Segundo Yildirim (2007) e Attaelmanan *et al.* (2011), a utilização de polímeros melhora a recuperação elástica, coesão e ductilidade, aumenta a temperatura de amolecimento e a viscosidade do betume. Além disso, a utilização destes materiais também procura limitar possíveis problemas de estabilidade mecânica resultantes da utilização do óleo de motor usado e do fundo de coluna. Tendo em conta que um dos objetivos deste

estudo é o desenvolvimento de betumes inovadores que maximizem a utilização de resíduos, sempre que possível considerou-se conveniente utilizar resíduos poliméricos para a sua valorização.

Um dos resíduos poliméricos utilizados neste estudo, denominado polietileno de alta densidade (HDPE), é um plastómero que ao ser adicionado ao betume reduz a sua penetração, aumenta o ponto de amolecimento (que poderá indicar maior resistência à deformação), é de fácil dispersão no betume e aumenta a resistência das misturas betuminosas à ação e à variação da temperatura (Al-Hadidy e Yi-Qiu, 2009, Costa *et al.*, 2013b, Hınıslioğlu e Ağar, 2004).

Outro resíduo polimérico utilizado neste estudo foi um elastómero, nomeadamente borracha de pneus usados (CR) moída através do processo criogénico. Quando adicionado ao betume, este resíduo aumenta a sua rigidez (redução do valor da penetração), reduz a deformação permanente (aumento da temperatura de amolecimento) e o fendilhamento a baixas temperaturas (Navarro *et al.*, 2002, Peralta *et al.*, 2012, Yildirim, 2007). Este resíduo, bem como o de HDPE, foram selecionados para este estudo pela sua elevada disponibilidade.

Para além dos resíduos supracitados, achou-se conveniente utilizar um polímero virgem amplamente estudado e utilizado na modificação de betumes, isto é, o estireno-butadieno-estireno (SBS). Segundo Ahmedzade (2013), este polímero melhora as propriedades elásticas do betume, aumenta a resistência à deformação permanente em climas com temperaturas elevadas e a resistência ao fendilhamento por fadiga. Aliado a isso, a modificação do betume com SBS baixa os valores de penetração e aumenta a temperatura de amolecimento, o que acarreta um aumento da rigidez do betume. Não foi possível utilizar resíduos deste material, pela dificuldade em obter os mesmos junto das empresas que fazem a recolha e separação de materiais plásticos usados.

Para caracterização destes materiais, é essencial conhecer algumas propriedades físicas dos polímeros HDPE, SBS e CR, nomeadamente a sua dimensão e densidade. A densidade dos polímeros é importante pois tem influência na estabilidade ao armazenamento dos betumes modificados (esta característica depende da diferença de densidade entre o material em suspensão, o polímero, e o meio contínuo, o betume). A dimensão dos polímeros é a indicada pelo fornecedor ou a resultante de uma moagem adicional, enquanto a densidade foi determinada segundo a norma ASTM D792 (método A).

Por sua vez, a avaliação do comportamento térmico dos polímeros tem como finalidade obter a temperatura de transição vítrea e/ou fusão, a temperatura de oxidação e as variações de massa com o aumento da temperatura. Estas temperaturas permitem caracterizar os polímeros e prever o seu comportamento quando adicionados ao betume, de modo a evitar problemas de degradação dos polímeros (para temperaturas muito elevadas) ou de dificuldade de compactação das misturas (para temperaturas próximas do ponto de fusão dos polímeros). O comportamento térmico dos polímeros é obtido com o ensaio de Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC), enquanto o ensaio de Análise Termogravimétrica (TGA) permite caracterizar a decomposição e estabilidade térmica dos polímeros sob várias condições e avaliar a velocidade dos processos físicos e químicos que ocorrem.

Por último, a análise química através do Ensaio Espectroscopia FTIR irá permitir avaliar os diferentes compostos químicos presentes na constituição dos resíduos poliméricos, comparando-os com as típicas constituições químicas dos polímeros virgens. Esta análise irá permitir verificar a eventual existência de degradações na constituição dos resíduos poliméricos.

3.3.1. Propriedades físicas

O polímero SBS foi fornecido com uma dimensão máxima de 4 mm, enquanto a borracha de pneus usados tinha uma dimensão compreendida entre 0,18 e 0,6 mm. No caso do HDPE, este teve que ser submetido a uma moagem adicional de modo a reduzir a sua dimensão para um valor máximo de 4 mm (para garantir uma maior homogeneização da dimensão dos polímeros, nomeadamente com o SBS), uma vez que foi facultado com uma dimensão ligeiramente superior.

Para além da dimensão, procedeu-se à determinação da densidade dos polímeros com o objetivo principal de obter informação adicional, nomeadamente sobre o comportamento esperado dos betumes modificados com estes polímeros quanto à sua estabilidade ao armazenamento. O ensaio para a determinação da densidade foi realizado segundo a norma ASTM D792 (método A), e consiste em pesar uma dada amostra do polímero ao ar, e em seguida pesá-la submersa em água a 23 °C.

O HDPE apresentou uma densidade de 0,810 g/cm³, cujo valor é inferior ao intervalo de densidades usuais do polímero HDPE (0,942 g/cm³ a 0,965 g/cm³). Contudo, esta diferença pode ser explicada pelo facto do HDPE utilizado ser um polímero reciclado e, como tal, poder ter sofrido processos químicos e mecânicos que alteraram as suas características, inclusive a sua densidade. A densidade obtida para

o SBS foi a que constava na ficha técnica do produto, que corresponde a um valor de $0,935 \text{ g/cm}^3$ (compreendida no intervalo de $0,930 \text{ g/cm}^3$ a $1,100 \text{ g/cm}^3$ típico do polímero SBS). Por sua vez, a borracha de pneus usados exibiu uma densidade de $1,173 \text{ g/cm}^3$, muito próxima dos valores referidos na literatura (Dong *et al.*, 2012, Lo Presti, 2013, Zhang e Hu, 2015).

Estes resultados demonstram que o HDPE e SBS apresentam densidades inferiores ao betume convencional (cuja densidade é cerca de $1,030 \text{ g/cm}^3$), o que poderá indicar uma possível separação de fase entre os polímeros (fase dispersa) e o betume ao avaliar a estabilidade ao armazenamento. Para além disso, importa salientar que o betume produzido com borracha também não apresenta estabilidade ao armazenamento, devido à maior densidade da borracha e à sua menor interação química com o betume, sendo necessário produzir estes ligantes aquando a produção das misturas betuminosas.

3.3.2. Propriedades térmicas

O ensaio de calorimetria de varrimento diferencial (DSC) permite medir as variações de energia que ocorrem quando uma amostra é aquecida, arrefecida ou mantida a temperatura constante. Para além disso, permite definir e medir as transições de fase que ocorrem no material, nomeadamente a temperatura de transição vítrea e de fusão (Gabbott, 2008).

Como tal, com este ensaio é possível identificar a temperatura de fusão (quando o polímero se torna líquido) e/ou temperatura vítrea (quando o polímero passa a exibir um comportamento dúctil) dos polímeros. Tal como foi mencionado anteriormente, o HDPE é um polímero semicristalino que tem temperaturas de transição vítrea e de fusão. Por sua vez, o SBS e a borracha são polímeros amorfos, e apenas exibem temperaturas de transição vítrea. O ensaio DSC consiste em colocar uma amostra com 10 a 20 mg numa cápsula de alumínio selado, sujeita a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min , num intervalo de temperaturas de -60 °C a 160 °C , ao longo de dois ciclos de aquecimento e um de arrefecimento. O ensaio foi realizado com auxílio do equipamento *DSC200-F3*. Assim, na Figura 3.6 estão contempladas as curvas DSC dos três polímeros utilizados neste estudo.

O HDPE apresenta uma temperatura de fusão (T_m) de 131 °C , correspondente ao pico visível no gráfico. Este valor é muito próximo da temperatura característica de fusão de um HDPE virgem (136 °C , segundo Garforth e Stancliffe (1994)). Devido à limitação técnica do equipamento, que não atinge temperaturas inferiores a -60 °C , não foi possível determinar a temperatura de transição vítrea típica do HDPE (-85 °C).

Relativamente à curva DSC do SBS, é possível verificar uma inflexão no intervalo de temperaturas de 60 °C aos 80 °C, correspondente à temperatura de 77 °C. Esta temperatura é ligeiramente superior à temperatura de transição vítrea (T_g) típica do bloco de estireno, que de acordo com Kennedy *et al.* (2009) é cerca de 69 °C. Deste modo, pode considerar-se que a temperatura obtida (77 °C) é uma das temperaturas de transição vítrea do polímero em análise. Tal como mencionado anteriormente, voltou a não ser possível obter a temperatura de transição vítrea correspondente ao bloco de butadieno (aproximadamente -90 °C) devido à limitação da temperatura mínima imposta pelo equipamento.

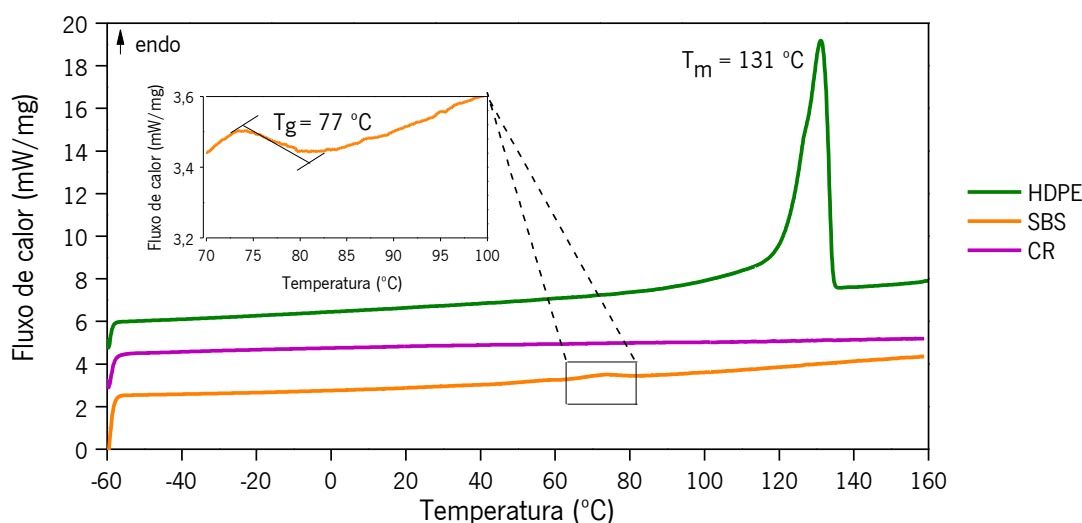


Figura 3.6. Curvas DSC dos polímeros HDPE, SBS e CR utilizados neste estudo.

De acordo com Thodesen *et al.* (2009), é possível através do DSC determinar a presença de borracha natural e/ou sintética numa amostra de borracha de pneus usados. O mesmo autor refere que a temperatura de transição vítrea da borracha sintética é de aproximadamente -108 °C, enquanto a da borracha natural é cerca de -70 °C, também confirmada por Prasertsri *et al.* (2013) e Shi *et al.* (2014). Uma vez que as temperaturas vítreas em questão são inferiores à temperatura mínima que o equipamento utilizado é capaz de obter, e tal como se pode observar na Figura 3.6, não foi possível determinar as temperaturas de transição vítrea desta borracha de pneus usados.

Após análise das curvas DSC é possível concluir que às temperaturas de produção dos betumes modificados tipicamente utilizadas, entre 170 a 180 °C, o HDPE encontra-se totalmente fundido. Por outro lado, o SBS e a CR apresentam um comportamento dúctil (elástico e moldável), mas nunca chegam a fundir. Deste modo, o HDPE será facilmente disperso no betume, contrariamente ao SBS e CR, que devido ao seu comportamento dúctil mas não fluído a elevadas temperaturas, são dispersos no betume

com mais dificuldade. O facto de o HDPE apresentar uma temperatura de transição de 131 °C, podendo encontrar-se na gama de temperaturas de compactação da mistura, poderá dificultar a compactação devido ao rápido endurecimento da mistura abaixo dessa temperatura. Este fator deverá ser tido em conta na avaliação das condições de produção e compactação.

Em seguida procedeu-se à análise termogravimétrica dos polímeros, para caracterizar a sua decomposição e estabilidade térmica sob várias condições e avaliar a velocidade dos processos físicos e químicos que ocorrem. Tal como foi mencionado anteriormente, a termogravimetria mede a variação de massa da amostra em função da temperatura ou do tempo.

De salientar que nem todos os fenómenos térmicos provocam alterações de massa, tais como a fusão, cristalização e temperatura de transição vítrea (que são medidos através do DSC). Contudo, importantes fenómenos que provocam alterações de massa, nomeadamente a absorção, sublimação, vaporização, oxidação e decomposição (Hatakeyama e Quinn, 1995) podem ser avaliados através deste ensaio.

Deste modo e, tal como se pode observar na Figura 3.7, o HDPE apenas apresenta uma fase de perda de massa (existência de apenas um pico na curva DTG), de 97,9%, e que inicia à temperatura 367 °C, representativa deste tipo de plastómero (Araújo *et al.*, 2008, Contat-Rodrigo *et al.*, 2002). A temperatura à qual a perda de massa ocorre é claramente superior à temperatura de produção dos betumes modificados em estudo (170 °C a 180 °C), o que indica que à temperatura de produção não há absorção, sublimação, vaporização, oxidação ou decomposição do polímero.

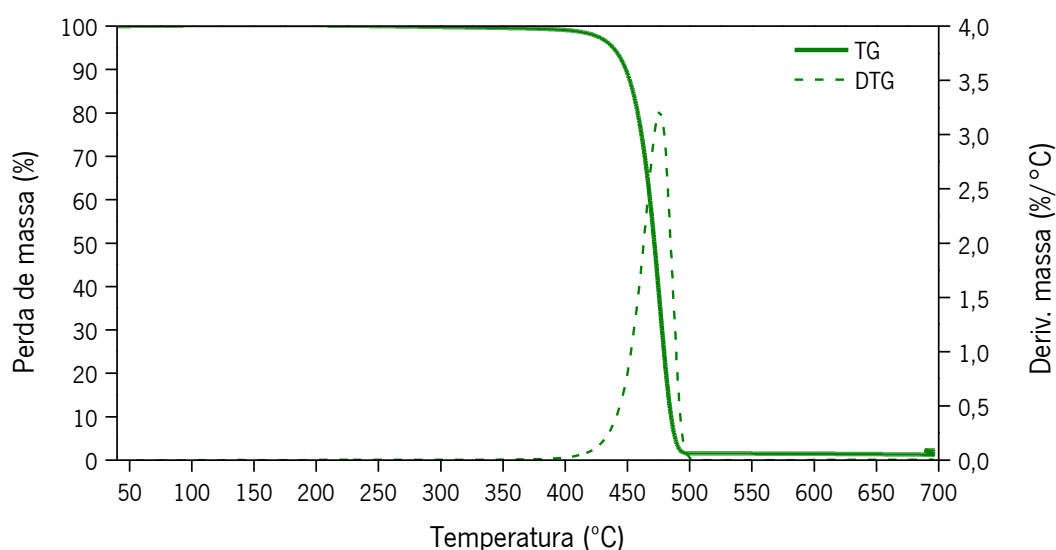


Figura 3.7. Curva termogravimétrica do polímero HDPE.

De acordo com os autores Wu *et al.* (2010) e Munteanu *et al.* (2005) a degradação do polímero SBS ocorre em duas fases: i) degradação do bloco de butadieno que ocorre a uma temperatura de cerca de 232 °C; e, ii) degradação do bloco de estireno a uma temperatura de cerca de 437 °C. Para além disso, segundo Serrano *et al.* (2004), a perda de massa na primeira fase é muito inferior à perda de massa da fase dois, relativa ao bloco de estireno.

Esse tipo de comportamento do SBS também pode ser observado na Figura 3.8, onde se verificam duas fases de perda de massa (picos na curva DTG), que iniciam às temperaturas de 322 °C e 400 °C, respetivamente. A primeira fase de perda de massa, associada ao bloco de butadieno, apresenta uma perda de massa de apenas 10%, enquanto a degradação associada ao bloco de estireno, na segunda fase, exibe uma perda de massa de 89%.

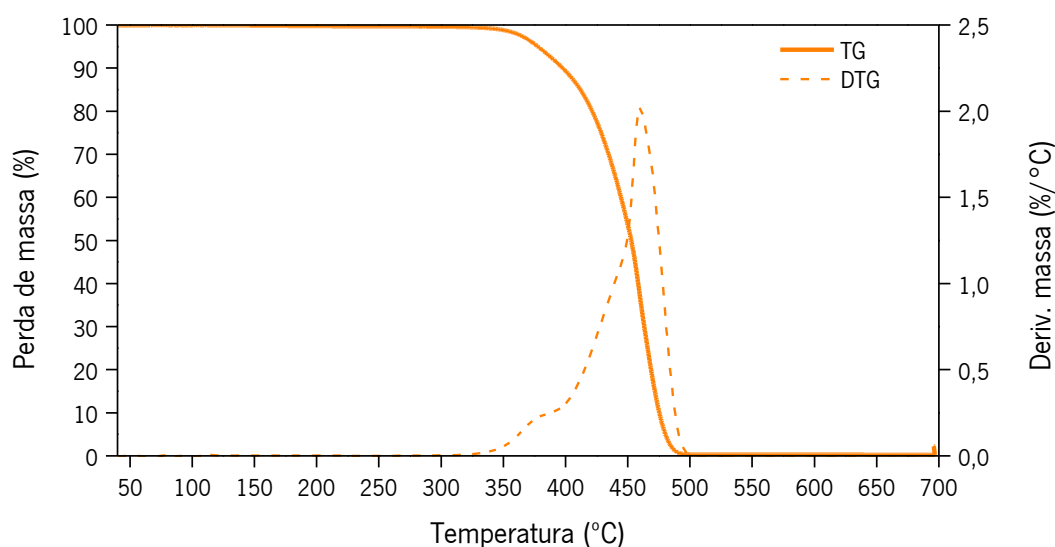


Figura 3.8. Curva termogravimétrica do polímero SBS.

Tal como se verificou no polímero HDPE, também o polímero SBS não apresenta nenhuma degradação ou perda de massa às temperaturas típicas de produção dos betumes modificados, garantindo assim que as suas propriedades não sofrem qualquer alteração durante a produção dos betumes e das misturas betuminosas desenvolvidos neste trabalho.

Por último, e de acordo com Chen e Qian (2003) e Ghavibazoo e Abdelrahman (2013), a borracha de pneus usados apresenta tipicamente três fases diferentes de perda de massa que permitem distinguir os seus diferentes constituintes. De acordo com os mesmos autores, a primeira fase de perda de massa ocorre a aproximadamente 300 °C devido à perda dos óleos, compostos voláteis, plastificantes e

aditivos. Em seguida, entre as temperaturas de 300 °C e 500 °C será possível verificar na curva da derivada da perda de massa dois picos distintos. Esses picos estão relacionados com os compostos poliméricos tipicamente utilizados nos pneus, nomeadamente a borracha natural e a borracha sintética, respetivamente. Para temperaturas superiores a 500 °C pode ocorrer a perda de massa de filler inorgânico, fuligem ou negro de fumo e cinzas, cuja reação é desencadeada na presença de oxigénio (Fernández-Berridi *et al.*, 2006).

Essas três fases diferentes de perda de massa podem ser visualizadas na Figura 3.9, correspondente à curva termogravimétrica da borracha de pneus usados (CR) utilizada neste estudo. Assim, é possível verificar uma pequena perda de massa de 10% correspondente à perda de compostos voláteis, óleos, entre outros, que inicia aos 115 °C. Por sua vez, entre os 300 °C e os 500 °C observam-se duas perdas de massa, de 26% cada, correspondentes a dois picos consecutivos na curva DTG, e relacionadas com a presença de borracha natural e sintética. Por último, pode ainda verificar-se um ligeiro pico na curva DTG próxima dos 600 °C que pode estar relacionado com a fuligem ou negro de fumo, apesar de não ter sido usado oxigénio nesta fase do ensaio, o qual poderia potenciar uma maior perda de massa destes materiais.

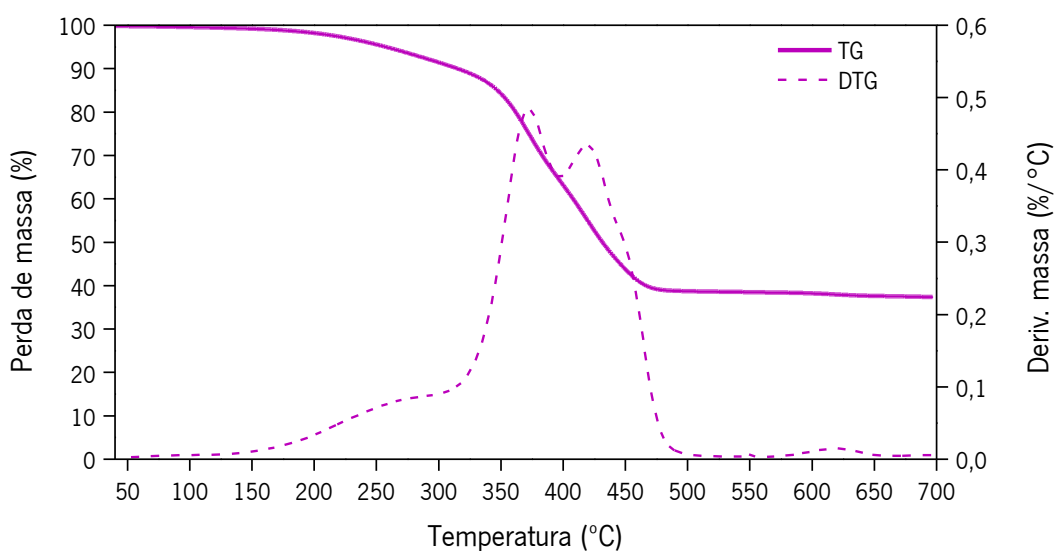


Figura 3.9. Curva termogravimétrica do polímero CR.

Apesar de existir uma ligeira perda de massa da borracha (inferior a 3%) na gama de temperaturas de produção do betume borracha (170 a 180 °C), a perda máxima de massa da mesma nessa fase ocorre a uma temperatura muito superior às previamente mencionadas (ou seja, a 250 °C).

Da análise termogravimétrica dos diferentes polímeros utilizados neste estudo (HDPE, SBS e CR) pode constatar-se que estes se mantêm estáveis termicamente às temperaturas de produção dos betumes modificados. Deste modo, as suas características mecânicas estão garantidas durante o processo de modificação dos betumes.

3.3.3. Propriedades químicas

No que diz respeito à constituição química dos polímeros, esta foi avaliada através do equipamento FTIR *Jasco*, em transmitância e tendo em conta a gama de números de onda e varrimentos anteriormente utilizada na análise química dos óleos e betume convencional. A preparação das amostras dos polímeros a analisar (HDPE e SBS) consiste na colocação de alguns grânulos entre duas folhas de *teflon*, que posteriormente são colocadas numa prensa a 180 °C até se obter um filme muito fino.

Importa referir que no caso da borracha, devido à dificuldade de produzir um filme muito fino, optou-se pela análise FTIR em reflexão total atenuada (ATR). Deste modo, uma pequena quantidade de grânulos foi colada diretamente em contacto com o cristal do equipamento e a gama de números de onda estudada variou de 4000 cm⁻¹ a 500 cm⁻¹, com 64 varrimentos.

Da análise do espectro do HDPE (Figura 3.10) é possível verificar a ocorrência de picos de transmitância nos números de onda 2918 cm⁻¹ e 2848 cm⁻¹ referentes ao estiramento assimétrico e simétrico do metileno (CH₂). Para além disso, existe um pico de transmitância no número de onda 1463 cm⁻¹ relativo à deformação por flexão da ligação C-H, enquanto o pico de transmitância da deformação simétrica do metilo (CH₃) ocorre aos 1376 cm⁻¹. Outro dos picos mais significativos e característicos do polietileno de alta densidade sucede aproximadamente no número de onda 719 cm⁻¹ devido à deformação por rotação do metileno.

Os mesmos picos também foram observados nos estudos anteriores de Gulmine *et al.* (2002) e Pandey (2006). Importa ainda salientar que ocorre um pico no número de onda 1757 cm⁻¹ característico de uma ligação de carbono com oxigénio (C=O). Este pico pode dever-se à presença de ésteres, cetonas e aditivos, ou até mesmo à própria degradação a que o polímero esteve sujeito, uma vez que se trata de um resíduo.

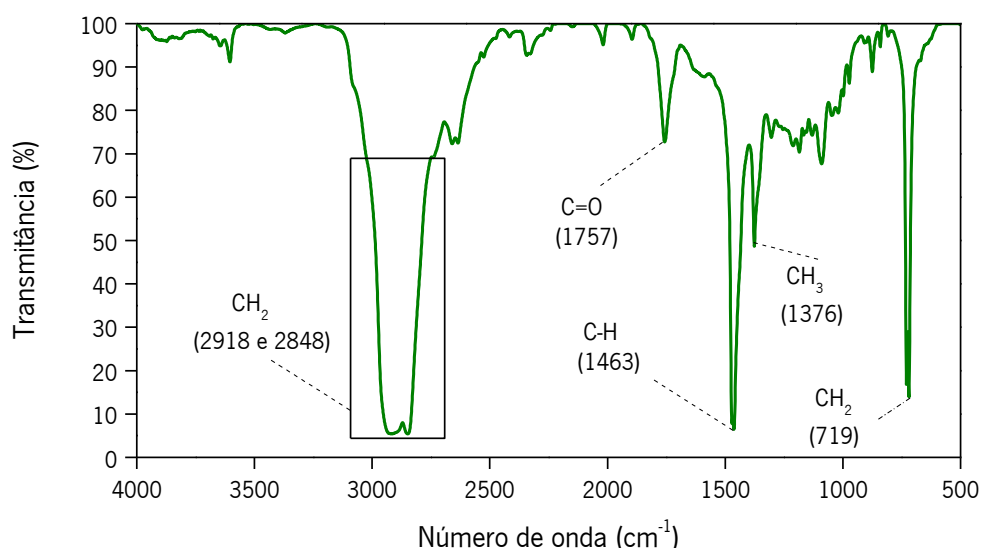


Figura 3.10. Espectro FTIR do polímero HDPE.

Em seguida analisou-se o estireno-butadieno-estireno (SBS). De acordo com Kennedy *et al.* (2009) e Larsen *et al.* (2009) o espectro do SBS exibe picos em diferentes números de onda típicos dos seus blocos constituintes, ou seja, relacionados com o bloco de butadieno ou com o bloco de estireno. Tendo isto em conta, o espectro FTIR do polímero SBS utilizado neste estudo é apresentado na Figura 3.11.

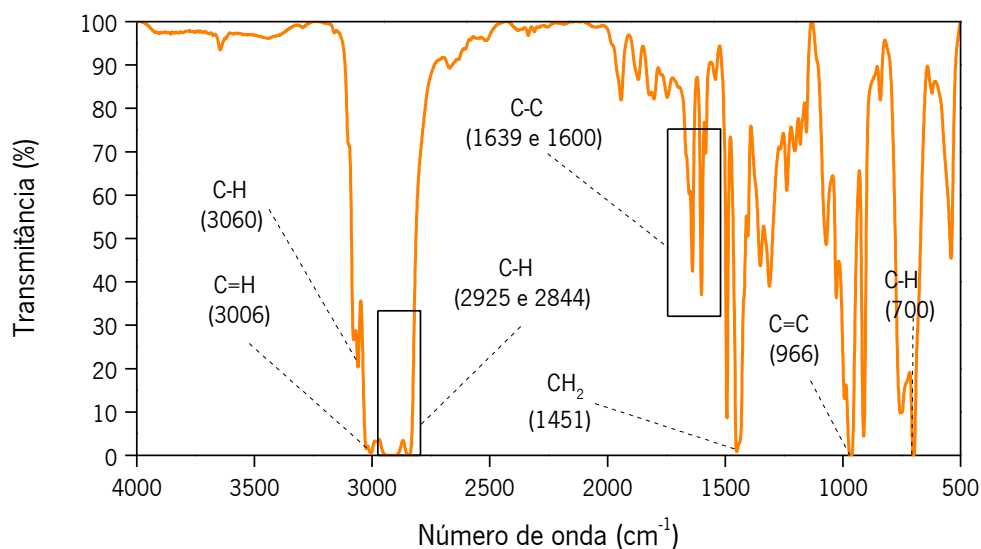


Figura 3.11. Espectro FTIR do polímero SBS.

Relativamente ao bloco de estireno, este exibe picos de transmitância nos números de onda 3060 cm^{-1} e 700 cm^{-1} devido à deformação por flexão da ligação C-H e um pico duplo de estiramento da ligação C-C nos números de onda 1639 cm^{-1} e 1600 cm^{-1} . Quanto ao bloco de butadieno, os picos característicos estão relacionados com o estiramento da ligação C=H no número de onda 3006 cm^{-1} , com o estiramento

da ligação C-H aos 2925 cm^{-1} e 2844 cm^{-1} , com a deformação angular do metileno (CH_2) no número de onda 1451 cm^{-1} e, por último, com a deformação por flexão da ligação dupla de carbono ($\text{C}=\text{C}$) no número de onda 966 cm^{-1} .

Finalmente, procedeu-se à análise do espectro da borracha de pneus usados (Figura 3.12), no qual é possível verificar picos de transmitância nos números de onda 2914 cm^{-1} e 2844 cm^{-1} referentes ao estiramento da ligação C-H (típica dos elastómeros). Aliado a isso, existem vários picos de transmitância entre os números de onda 1535 e 670 cm^{-1} relacionados a ligação C=H em benzeno, característica do polímero estireno-butadieno-borracha (SBR) muito utilizado na produção de borracha para pneus. O espectro FTIR também apresenta um pico no número de onda 1795 cm^{-1} característico de uma ligação de carbono com oxigénio ($\text{C}=\text{O}$), que pode ser relacionada com o envelhecimento da borracha. Picos semelhantes foram mencionados por Dong *et al.* (2012), Formela *et al.* (2015) e Peralta *et al.* (2013).

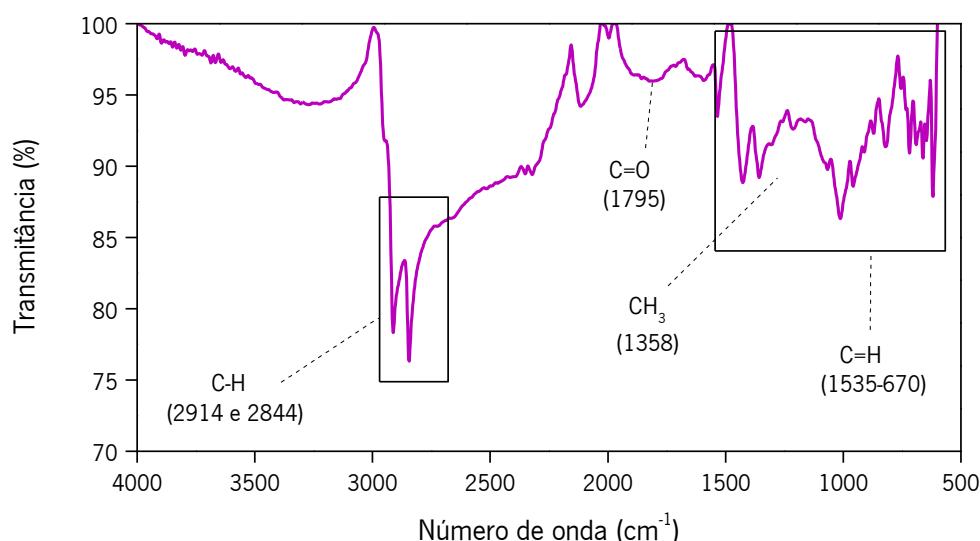


Figura 3.12. Espectro FTIR do polímero CR.

Através da análise FTIR dos polímeros foi possível verificar a presença de ligações químicas relacionadas com a sua degradação (com o aparecimento de ligações $\text{C}=\text{O}$), particularmente nos resíduos poliméricos em estudo, ou seja, o polietileno de alta densidade e a borracha de pneus usados. Apesar de apresentarem evidências de alguma degradação, quando adicionados aos betumes modificados é habitual apresentarem um comportamento semelhante aos polímeros virgens (sem degradações), com vantagens ambientais e económicas inerentes (Fuentes-Audén *et al.*, 2008, González *et al.*, 2012) que justificam a sua inclusão neste trabalho.

3.4. Materiais inertes

O óleo de motor usado, o fundo de coluna e os polímeros são os materiais diferenciadores utilizados neste trabalho para desenvolvimento de betumes modificados inovadores, o que justificou uma caracterização mais exaustiva dos mesmos ao longo deste capítulo. No entanto, para além desses materiais e dos betumes base e de controlo anteriormente mencionados, também será necessário utilizar materiais inertes para produção de misturas betuminosas com os betumes desenvolvidos.

Assim, é fundamental que se proceda à descrição dos agregados e filler selecionados para produção das misturas, nomeadamente quanto aos fornecedores, à sua origem petrográfica, frações em que foram fornecidos e respetivas propriedades físicas e mecânicas.

3.4.1. Agregados

Os agregados utilizados neste estudo, fornecidos pela empresa Bezerras, Lda., são de origem granítica. Tendo em conta a descrição petrográfica presente na respetiva ficha técnica, os mesmos são originários de uma rocha holocristalina de grão médio grosseiro, equigranular e anédrico, mesocrata de tonalidade acinzentada, cujos principais constituintes são quartzo (30%), feldspato (45%) e biotite (25%).

Os agregados em análise foram fornecidos em duas frações distintas, nomeadamente 0/4 e 6/14, cujas curvas granulométricas obtidas pela norma EN 933-1 podem ser visualizadas na Figura 3.13.

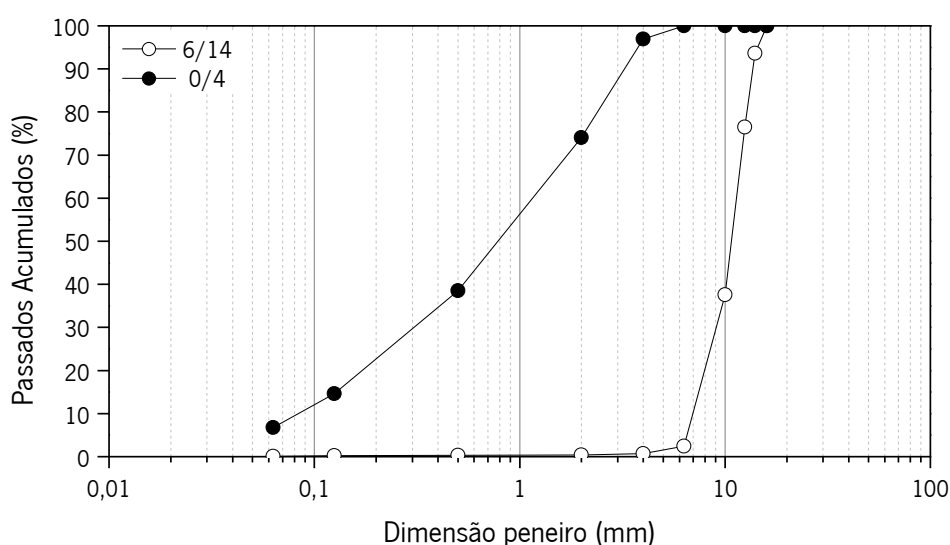


Figura 3.13. Curva granulométrica dos agregados em estudo.

Posteriormente, a granulometria dos agregados será essencial para a fase do estudo de formulação das misturas, quando é necessário verificar o cumprimento dos limites especificados para as misturas a desenvolver. A mistura SMA tem granulometria descontínua e é utilizada essencialmente em camada de desgaste, o que justifica a descontinuidade e a máxima dimensão de 14 mm das frações de agregados selecionadas.

As restantes propriedades dos agregados, contempladas na ficha técnica do produto, podem ser verificadas no Quadro 3.3. Importa salientar que as diversas propriedades aí apresentadas vão de encontro aos requisitos da norma NP EN 13043, também exigidos no caderno de encargos da Infraestruturas de Portugal.

Quadro 3.3. Propriedades físicas e mecânicas dos agregados utilizados neste estudo.

Propriedades	Norma	Unidade	Valor
Índice de achatamento (fração 6/14)	NP EN 933-3	-	FI15
Resistência à fragmentação (fração 6/14)	NP EN 1097-2	%	LA ₃₀
Resistência ao desgaste por atrito (fração 6/14)	NP EN 1097-1	%	M _{DE} 15
Massa volúmica das partículas (duas frações)	NP EN 1097-6	Mg/m ³	2,66
Absorção de água (duas frações)	NP EN 1097-6	%	≤1
Baridade (fração 0/4)	NP EN 1097-3	Mg/m ³	1,34
Baridade (fração 6/14)	NP EN 1097-3	Mg/m ³	1,47

3.4.2. Filer

O filer utilizado neste estudo é um filer comercial de carbonato de cálcio natural, fornecido pela empresa Omya Comital S.A., que cumpre os requisitos normativos impostos pela norma EN 13043 de acordo com a sua ficha técnica.

Relativamente à granulometria do filer, obtida pela norma EN 933-1, esta apresenta uma percentagem acumulada de material passado igual a 100% para partículas inferiores a 2 mm, 98% para partículas inferiores a 0,125 mm e 82% para partículas inferiores a 0,063 mm. As restantes propriedades do filer calcário podem ser consultadas no Quadro 3.4.

Quadro 3.4. Propriedades do filer calcário utilizado neste estudo.

Propriedades	Norma	Unidade	Valor
Massa volúmica das partículas	NP EN 1097-7	Mg/m ³	2,7
Teor em água	EN 1097-5	%	0,1
Vazios do filer seco compactado (Rigden)	EN 1097-4	%	32
Superfície específica – Ensaio Blaine	EN 196-6	m ² /kg	5100
Qualidade dos finos – valor de azul metileno	NP EN 933-9	g/kg	0,6

3.4.3. Fibras

A mistura *Stone Mastic Asphalt* (SMA) que será estudada neste trabalho é constituída por três principais componentes, nomeadamente o esqueleto pétreo (com granulometria descontínua e uma elevada percentagem de agregado de maior dimensão), mástique betuminoso (betume, filer, agregado fino e estabilizadores) e vazios (Blazejowski, 2011). Devido à descontinuidade do esqueleto pétreo é necessário que uma parte significativa dos vazios sejam preenchidos por mástique, razão pela qual estas misturas são constituídas por uma quantidade de betume e filer superior às misturas convencionais (betões betuminosos). Nestas misturas, para evitar a ocorrência de escorrimento ou drenagem do betume é preciso utilizar betumes modificados, ou então adicionar estabilizadores ou aditivos aos betumes convencionais, utilizando-se normalmente fibras para esse fim (Gardete *et al.*, 2011).

Assim, para evitar a ocorrência de escorrimento do betume nas misturas SMA produzidas neste estudo, em particular nas misturas de controlo que não utilizaram betumes modificados, foi necessário utilizar um aditivo estabilizador. Para esse fim, selecionou-se uma fibra acrílica (Figura 3.14) que foi adicionada às misturas referidas durante a sua produção.



Figura 3.14. Fibras acrílicas utilizadas neste estudo.

As fibras acrílicas foram facultadas pela empresa FISIPE, e apresentam um comprimento compreendido entre 6 e 12 mm, um diâmetro nominal de 14,4 μm e uma densidade de 1,17 g/cm^3 .

3.5. Material fresado

Um dos objetivos deste trabalho é utilizar os betumes modificados com resíduos desenvolvidos para produção de misturas recicladas, de modo a aumentar a incorporação de materiais em fim de vida nas misturas betuminosas e a minimizar a extração de novos materiais, de acordo com os novos paradigmas da economia circular.

Para ser possível comparar essas misturas recicladas com as produzidas sem material fresado, considerou-se fundamental que as misturas recicladas também fossem do tipo SMA. Com base num trabalho anterior com misturas recicladas (Abreu, 2017), definiu-se à partida uma taxa de incorporação de material fresado de 50%. Estes pressupostos aumentaram a exigência durante a fase de formulação das misturas recicladas (Capítulo 6), pela dificuldade em ajustar a granulometria contínua do material fresado aos limites especificados para a mistura SMA reciclada a produzir (por se tratar de uma mistura que apresenta granulometria descontínua), mas foi possível garantir esse ajuste recorrendo à separação do material fresado em duas frações, tal como se descreve em seguida.

O material fresado a incorporar nas misturas recicladas foi obtido através da fresagem da camada de desgaste de pavimentos degradados de uma autoestrada. Posteriormente, esse material foi separado em duas frações (denominadas fração fina e fração grossa) com um separador industrial, recorrendo para isso a um crivo de abertura igual a 8 mm. O material fresado já foi fornecido separado nas duas frações referidas pela empresa ELEVO Group.

As duas frações de material fresado são compostas por betume envelhecido e agregados, sendo por isso necessário determinar a sua percentagem de betume (com base no método de incineração da norma EN 12697-39) e a granulometria dos agregados existentes no material fresado (norma EN 12697-2). De facto, essa informação é fundamental para se poder formular as misturas recicladas no Capítulo 6. Para além disso, também é crucial proceder-se à recuperação do betume do material fresado (pelo método de evaporação rotativa, segundo a norma EN 12697-3) para posterior caracterização do betume envelhecido, mas também para o estudo dos betumes a utilizar nas misturas recicladas (Capítulo 6).

Deste modo, para a determinação da percentagem de betume (EN 12697-39) colocou-se uma amostra do material fresado a ensaiar, que foi previamente seca, numa mufla a cerca de 540 °C, até todo o betume ser incinerado. O peso de betume é obtido pela diferença entre o peso da amostra total e o peso da amostra após incineração do betume. Com base neste ensaio, verificou-se que a fração fina do material fresado apresentou uma percentagem de betume de 6,0%, enquanto a fração grossa exibiu uma percentagem de betume de 4,1%. Esta diferença deve-se ao facto da superfície específica do material da fração fina ser superior à do material da fração grossa. Assim, a fração fina do material fresado tem uma maior quantidade de betume, o que deverá ser levado em consideração aquando do processo de formulação das misturas recicladas.

Relativamente à granulometria da fração grossa e fina do material fresado, os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 3.15.

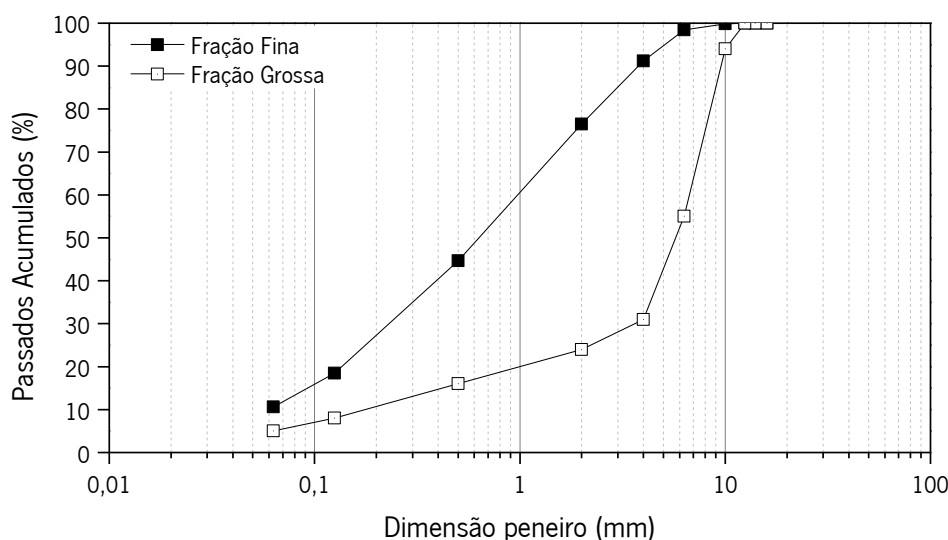


Figura 3.15. Curva granulométrica da fração fina e grossa do material fresado utilizado.

Apesar do material fresado ter sido separado no peneiro 8 mm (quando estava envolvido por betume), pode constatar-se que o fresado grosso é constituído essencialmente por agregados com dimensões entre 4 e 10 mm, tendo ainda cerca de 30% de material de dimensão inferior a 4 mm (correspondente a finos que envolviam os agregados grossos). Por sua vez, a fração fina apresenta uma granulometria contínua e com elevada percentagem de material mais fino, com dimensão máxima de 6 mm.

Finalmente, de forma a caracterizar o betume presente no material fresado é necessário proceder à sua recuperação de acordo com a norma EN 12697-3. Dado que as duas frações do material fresado vão

ser utilizadas de forma conjunta na mistura SMA reciclada, optou-se por realizar a recuperação do betume ao material fresado que resultou de juntar 70% do fresado grosso com 30% do fresado fino. Estas foram as proporções em que estes materiais foram utilizados na produção das misturas SMA, como resultado do seu estudo de composição apresentado no Capítulo 6 (concluído antes desta caracterização).

A recuperação do betume envelhecido do material fresado é um processo com 3 fases. A primeira consiste numa lavagem do material fresado, por centrifugação e filtragem, com o objetivo de separar os agregados mais grossos. Em seguida, na fase 2, procede-se à separação dos elementos finos da solução composta por betume, solvente e agregados finos, com recurso à centrifugação dos mesmos a uma velocidade de 3000 rpm durante 10 min. A fase final contempla a recuperação do betume da solução resultante (betume mais solvente) por destilação em vácuo através do evaporador rotativo.

O betume recuperado do material fresado (betume envelhecido) foi caracterizado através do ensaio de penetração a 25 °C (de acordo com a norma EN 1426), do ensaio de temperatura de amolecimento (norma EN 1427), do ensaio de resiliência (de acordo com a norma EN 13880-3) e do ensaio de viscosidade dinâmica (norma EN 13302).

Este betume envelhecido recuperado do material fresado apresentou uma penetração de $8,8 \times 10^{-1}$ mm, uma temperatura de amolecimento de 74 °C e uma resiliência nula, verificando-se assim que o material fresado contém um betume muito rígido e envelhecido. Relativamente ao ensaio de viscosidade, para as temperaturas de 135 e 180 °C, este betume exibe viscosidades de 3,8 e 0,3 Pa.s, respetivamente. Pode constatar-se mais uma vez a elevada rigidez do betume, uma vez que este apenas atinge a viscosidade ideal para produção de betumes (0,3 Pa.s) à temperatura de 180 °C, claramente superior às típicas temperaturas de produção dos betumes convencionais (150 e 165 °C).

As características deste betume envelhecido recuperado do material fresado vão ser essenciais para a posterior caracterização e seleção dos betumes modificados com resíduos a utilizar nas misturas betuminosas recicladas. De facto, foi necessário proceder à recuperação de quantidades adicionais deste betume envelhecido para ser adicionado aos betumes modificados com resíduos desenvolvidos neste trabalho, de forma a simular os betumes finais que existem nessas misturas recicladas.

4. DESENVOLVIMENTO DE BETUMES MODIFICADOS COM RESÍDUOS

4.1. Betumes modificados com produtos derivados de óleo de motor

De forma a perceber o efeito dos produtos derivados de óleo de motor no comportamento do betume convencional, numa primeira fase estudou-se a substituição/modificação do betume B35/50 com óleo de motor usado (O) ou com fundo de coluna de destilação (F). Para a produção destes betumes modificados utilizou-se um misturador de baixo corte (350 rpm), durante 20 min, à temperatura de produção das misturas quando se utiliza o betume convencional (150 °C). Em seguida foram retiradas amostras e analisadas as suas propriedades básicas, as suas propriedades reológicas (incluindo o comportamento à fluência e relaxamento), bem como, as suas propriedades térmicas.

Nesta fase do estudo, a percentagem inicial de óleo de motor usado e fundo de coluna foi de 10% em peso (BO10 e BF10, respetivamente). Esta percentagem é superior às percentagens típicas de rejuvenescedores ou óleos de diluição utilizadas. Apesar disso, percentagens superiores destes materiais foram posteriormente utilizadas, juntamente com polímeros, de forma a maximizar o uso destes resíduos como substitutos parciais do betume. Estes betumes (BO10 e BF10) foram comparados com o betume convencional utilizado (B35/50) e com o betume modificado comercial (PMB45/80-60) de modo a avaliar o efeito da incorporação destes resíduos.

4.1.1. Propriedades básicas

Tal como se pode observar na Figura 4.1a, os betumes modificados com óleo de motor ou fundo de coluna apresentam valores de penetração mais elevados, bem como, menores valores de temperatura de amolecimento comparativamente aos dois betumes comerciais, tal como esperado.

Adicionalmente, para a mesma percentagem de substituto parcial, o betume modificado com 10% de fundo de coluna apresenta uma penetração menor e uma temperatura de amolecimento maior do que o betume modificado com 10% de óleo de motor usado, que pode ser explicada pela maior viscosidade do fundo de coluna comparativamente ao óleo de motor usado. Estes resultados podem indicar a possibilidade de utilizar maiores quantidades de fundo de coluna para obter propriedades semelhantes às de um betume modificado com óleo de motor usado.

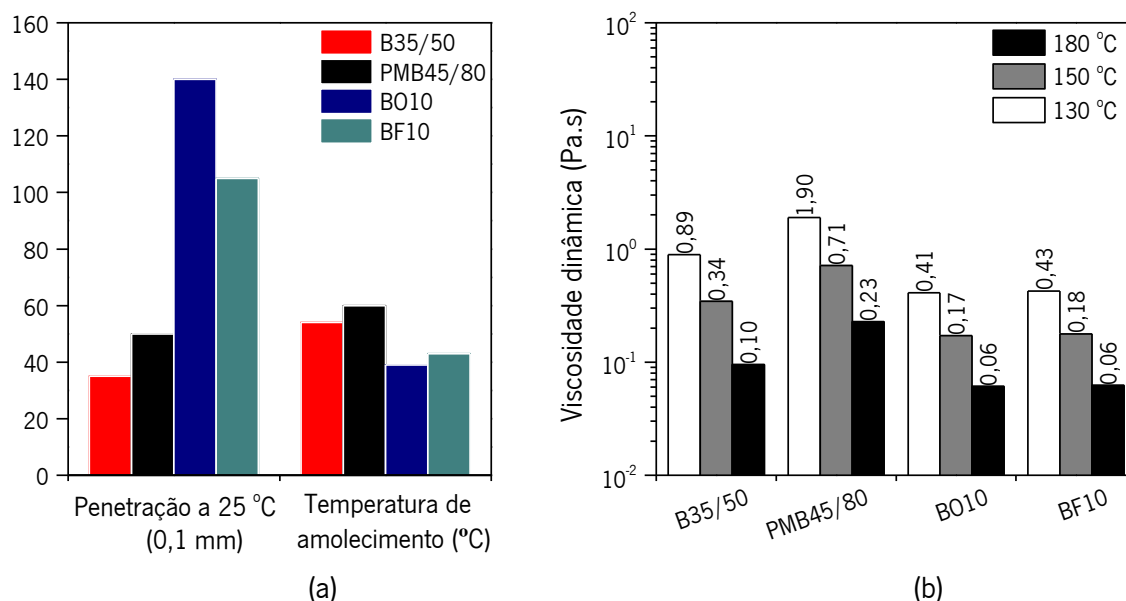


Figura 4.1. Resultados de (a) penetração, temperatura de amolecimento e (b) viscosidade dinâmica dos betumes de controlo e dos betumes modificados com 10% de óleo de motor usado ou fundo de coluna.

Relativamente aos resultados do ensaio de viscosidade dinâmica (Figura 4.1b), os betumes modificados com óleo de motor usado e fundo de coluna revelaram uma viscosidade inferior à viscosidade do betume convencional em praticamente toda a gama de temperaturas avaliadas.

Para além disso, a viscosidade do betume modificado com fundo de coluna é ligeiramente superior à viscosidade do betume modificado com óleo de motor usado, confirmando assim os resultados obtidos no ensaio de penetração a 25 °C. Contudo, ambos diminuem a temperatura de produção do betume convencional, uma vez que a temperatura de produção das misturas com o betume B35/50 (temperatura a que corresponde uma viscosidade dinâmica de 0,3 Pa.s) teve uma redução de 150 °C para 144 °C (betume modificado com óleo de motor usado) ou 140 °C (betume modificado com fundo de coluna).

Apesar da incorporação de óleo de motor usado e fundo de coluna no betume apresentar algumas vantagens (apresentadas anteriormente), as propriedades destes betumes não são adequadas para que estes sejam utilizados em misturas betuminosas convencionais, particularmente em situações com temperaturas de serviço elevadas. Como tal, deve recorrer-se à adição de polímeros para garantir um melhor desempenho deste tipo de betumes.

4.1.2. Propriedades reológicas

O ensaio de reologia tradicionalmente utilizado para caracterizar betumes permite obter dois parâmetros viscoelásticos que dependem da temperatura e tempo de carregamento, nomeadamente o módulo complexo (G^*) e o ângulo de fase (δ) (Ahmedzade, 2013, Kök e Çolak, 2011, Silva *et al.*, 2012). O módulo complexo representa a rigidez do betume, enquanto o ângulo de fase corresponde à resposta viscoelástica do betume (Widyatmoko e Elliott, 2008). Com esses parâmetros é possível determinar a temperatura mais elevada do grau PG (*Performance Grade*, classificação americana dada ao betume de acordo com as temperaturas mínimas e máximas do local de obra e do tráfego de projeto) através do rácio $|G^*|/\sin\delta$ (Asphalt Institute, 2003).

O ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 14770, mas para uma gama de frequência mais alargada (entre os 20 Hz e os 0,1 Hz), pois o equipamento AR-G2 permite uma maior gama de frequências do que as sugeridas pela norma, e às temperaturas de 30, 45, 60, 70 e 80 °C. As curvas mestras dos diferentes betumes foram obtidas para uma temperatura de referência de 60 °C, através do *software* IRIS, tendo em conta os fatores de translação descritos pelas equações de *Arrhenius* e *William-Landel-Ferry* (WLF).

Relativamente às propriedades reológicas dos betumes modificados com óleo de motor e fundo de coluna, tal como se pode observar na Figura 4.2a, estes apresentam módulos complexos inferiores, em toda a gama de frequências estudada, quando comparados com os betumes de controlo B35/50 e PMB45/80-60. Tal como os resultados de caracterização básica também confirmaram, a utilização destes substitutos parciais de betume reduz a rigidez do betume final. Adicionalmente, verifica-se que o betume modificado com óleo de motor usado e o betume modificado com fundo de coluna apresentam módulos complexos semelhantes.

Praticamente o mesmo tipo de comportamento pode observar-se relativamente ao ângulo de fase (Figura 4.2b). Contudo a temperaturas e frequências intermédias, o ângulo de fase do betume com fundo de coluna tende a aproximar-se do betume convencional. Para além disso, os betumes BO10 e BF10 apresentam ângulos de fase ligeiramente inferiores ao betume convencional, mas muito superiores aos do betume modificado comercial. Isto porque, devido às suas propriedades elásticas, o betume modificado comercial (PMB45/80) apresenta ângulos de fase mais baixos que o betume convencional e, consequentemente, dos betumes modificados com óleo de motor ou fundo de coluna.

Para além disso, da relação $|G^*|/\sin\delta$ obteve-se as temperaturas mais elevadas do grau PG de 52 e 58 °C, respetivamente, para os betumes modificados com óleo de motor (B010) e com fundo de coluna (BF10). Por sua vez, o betume de controlo B35/50 apresentou como temperatura mais elevada do grau PG o valor de 64 °C, enquanto o betume de controlo PMB45/80 uma temperatura mais elevada do grau PG de 70 °C. Deste modo verifica-se que os betumes B010 e BF10 caracterizam-se por deter uma temperatura mais elevada do grau PG inferior aos betumes de controlo, tendo o betume BF10 um grau PG mais elevado do que o betume B010. Estes betumes modificados deverão apresentar uma gama de temperaturas de serviço menor do que os betumes de controlo, tal como seria de esperar tendo em conta a caracterização básica efetuada.

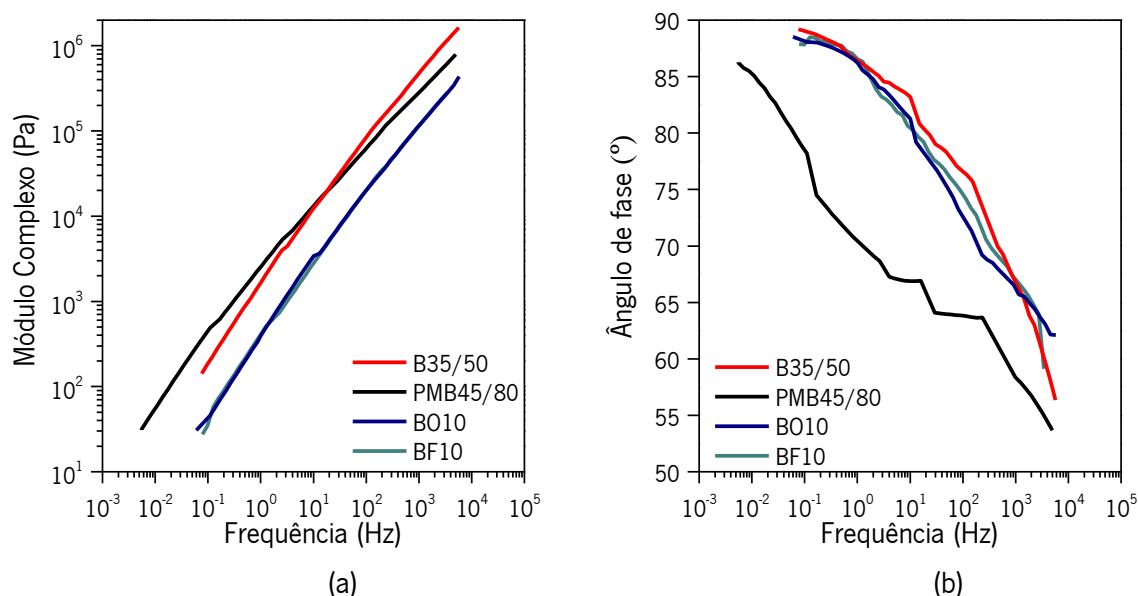


Figura 4.2. Curvas mestras ($T_{ref}=60$ °C) do (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase dos betumes de controlo e dos betumes modificados com 10% de óleo de motor usado ou fundo de coluna.

A caracterização reológica dos betumes modificados também pode ser realizada através do ensaio de fluência e relaxamento (*Multiple Stress Creep Recovery MSCR*). Este ensaio permite determinar a resposta elástica e não elástica (deformação permanente) do betume, quando sujeito a diferentes níveis de tensão, a uma dada temperatura. De acordo com a norma AASHTO TP 70-11, o parâmetro de deformação não recuperada (J_{nr}) fornece a indicação da resistência à deformação permanente de um dado betume quando submetido a cargas constantes e o seu valor deverá ser o menor possível de modo a indicar a maior resistência à deformação permanente.

O ensaio consiste em colocar uma amostra de betume com 1 mm de espessura, num prato com um diâmetro de 22 mm, à temperatura mais elevada do grau PG da zona em estudo, que em Portugal é 64 °C (Sousa, 1997). A amostra é depois sujeita a um ciclo de tensão durante 1 segundo, seguido de uma recuperação de 9 segundos (cada ciclo deve ser realizado 10 vezes para cada nível de tensão). Os níveis de tensão utilizados foram 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 Pa, tal como sugerido por Zoorob *et al.* (2012).

Tal como se pode observar pela Figura 4.3, os betumes modificados com óleo de motor ou fundo de coluna apresentam valores do parâmetro de deformação permanente superiores, quer ao betume B35/50, quer ao betume PMB45/80. Para além disso, a tendência de aumento do parâmetro de deformação permanente para as tensões mais elevadas é similar em todos os betumes em análise. Este aumento deve-se ao facto de, para a mesma temperatura, tensões mais elevadas provocarem uma maior deformação não recuperada do que tensões mais baixas.

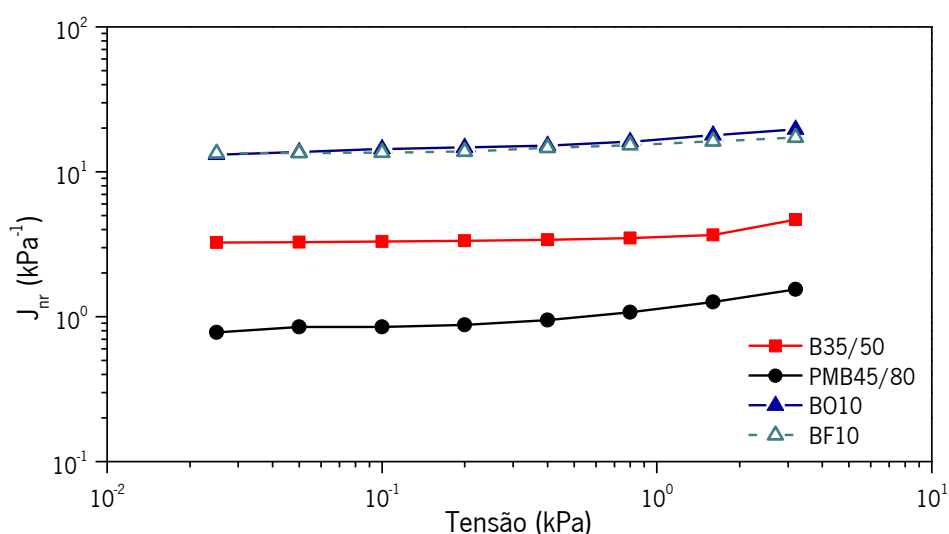


Figura 4.3. Parâmetro de deformação não recuperada (J_{nr}) dos betumes de controlo e dos betumes modificados com 10% de óleo de motor usado ou fundo de coluna.

Os elevados valores deste parâmetro nos betumes modificados com óleo de motor ou fundo de coluna pode indicar que estes betumes apresentam uma menor resistência à deformação permanente do que os betumes de controlo. As baixas temperaturas de amolecimento, assim como a baixa rigidez que apresentam vêm corroborar os resultados do parâmetro de deformação permanente e reforçar a indicação de um pior desempenho à deformação permanente. Deste modo e de forma a melhorar as propriedades destes betumes, nomeadamente, as elevadas penetrações, as baixas temperaturas de

amolecimento, os reduzidos módulos e os elevados parâmetros de deformação não recuperada, poderia adicionar-se polímeros. Os polímeros são utilizados na modificação dos betumes para melhorar as suas propriedades, nomeadamente, a recuperação elástica, a coesão e a ductilidade, a temperatura de amolecimento e a viscosidade dinâmica, tal como referido anteriormente.

4.1.3. Propriedades térmicas

As propriedades térmicas dos betumes de controlo, assim como a dos betumes modificados com 10% de óleo de motor usado ou fundo de coluna foram avaliadas através do ensaio de termogravimetria. O procedimento de ensaio foi igual ao utilizado para caracterização térmica dos substitutos parciais (óleo de motor usado e fundo de coluna).

Neste caso, as propriedades que se pretendem avaliar são a temperatura de início de perda de massa (T_{onset}) e a temperatura a que corresponde a perda de massa máxima (T_{max}) que podem ser observadas no Quadro 4.1. Deste modo, através da temperatura de início de perda de massa é possível verificar se os betumes modificados com 10% de óleo de motor ou fundo de coluna sofrem alguma alteração (perda de massa) durante o processo de modificação dos betumes, nomeadamente, à temperatura de 180 °C. Para além disso, esta temperatura permite ainda avaliar a estabilidade térmica de um dado betume.

Quadro 4.1. Resultados do ensaio de termogravimetria dos betumes de controlo e dos betumes modificados com 10% de óleo de motor usado ou fundo de coluna.

Betumes	T_{onset} (°C)	T_{max} (°C)
B35/50	262	453
PMB 45/80-60	229	443
B010	218	452
BF10	245	455

O betume B35/50 apresenta-se como o betume termicamente mais estável, uma vez que a sua perda de massa tem início a uma temperatura (262 °C) superior à dos restantes betumes em análise. O facto do betume modificado comercial ser menos estável termicamente do que o betume convencional B35/50 poderá estar relacionado com o facto de possuir um valor de penetração superior ao do betume convencional e, como tal, possuir maior componente volátil. Para além disso, a sua perda máxima de massa ocorre a uma temperatura ligeiramente inferior quando comparado com betume convencional.

Como seria de esperar, no que concerne aos betumes modificados com 10% de óleo de motor usado ou fundo de coluna, estes apresentam temperaturas de início de perda de massa inferiores ao betume convencional B35/50. De salientar que o betume modificado com fundo de coluna é mais estável termicamente do que o betume modificado com óleo de motor, uma vez que a perda de massa tem início à temperatura de 245 °C (no betume B010 essa temperatura é de 218 °C). Por sua vez, as perdas de massa máximas dos betumes B010 e BF10 ocorrem praticamente à mesma temperatura (452 e 455 °C, respetivamente).

Assim, pode concluir-se que a adição de óleo de motor usado ou fundo de coluna ao betume convencional não resulta em perdas de massa às temperaturas de produção dos betumes modificados (180 °C), o que acontece quando esses substitutos parciais são caracterizados isoladamente. Para além disso, verifica-se que a incorporação dos substitutos parciais tem maior influência nas temperaturas de início de perda de massa do que nas temperaturas onde ocorre a perda máxima, contribuindo assim para o aumento da componente volátil do betume convencional.

4.2. Estudo prévio da produção dos betumes modificados com resíduos

O estudo prévio da produção dos betumes modificados inovadores, assim como a influência da percentagem dos diferentes resíduos utilizados apenas foi realizado com o óleo de motor usado e com os polímeros em estudo (inicialmente apenas o HDPE e SBS e posteriormente a CR). O fundo de coluna apenas surgiu neste estudo mais tarde e após contacto com uma das entidades competentes de recolha do óleo de motor usado que mencionou a existência do mesmo. Depois de se ter recebido este resíduo foi necessário proceder a toda a sua caracterização e avaliação da possível toxicidade do mesmo, referida pela própria empresa. Aquando do término desta caracterização, toda a modificação dos betumes com óleo e polímeros já tinha sido efetuada e analisada. Visto que se tratam de materiais com comportamentos similares (ainda que com as devidas diferenças mencionadas no capítulo referente à sua caracterização) optou-se por usar o mesmo procedimento para os betumes modificados com este material e polímeros.

Deste modo, seguem-se os diferentes procedimentos avaliados para a produção dos betumes modificados com óleo de motor usado e polímeros, bem como, a influência nas propriedades básicas provocadas pelas diferentes percentagens de cada modificador.

4.2.1. Seleção do processo de produção dos betumes modificados

Devido à necessidade de utilizar polímeros para melhorar as propriedades do betume modificado com óleo de motor usado foi necessário avaliar o tipo de equipamento mais eficaz para o feito, bem como, o tempo e temperatura de digestão dos mesmos. Para além disso, após seleção do equipamento, tempo e temperatura de digestão achou-se importante estudar a ordem de introdução dos diferentes modificadores. Como tal, no procedimento 1 o óleo de motor é adicionado ao betume previamente aquecido e em seguida adiciona-se o polímero. Por sua vez, no procedimento 2 a introdução do polímero é feita no óleo de motor usado e, posteriormente ocorre a adição do betume.

Uma vez que anteriormente se procedeu à substituição do betume B35/50 com 10% de óleo de motor usado, utilizou-se a mesma percentagem de substituto parcial para a produção dos betumes modificados com óleo de motor usado e polímeros. A percentagem de polímero selecionada para este estudo prévio baseou-se na percentagem tipicamente utilizada na modificação de betumes, ou seja, 5%. De acordo com Dehouche *et al.* (2012), a modificação com 5% de SBS apresenta bons resultados e um comportamento estável. Deste modo foram produzidos dois betumes com 10% de óleo de motor usado e 5% de HDPE ou SBS (B010H5 e B010S5, respetivamente).

Apenas se utilizaram os polímeros HDPE e SBS na análise do procedimento de produção dos betumes modificados, uma vez que estes foram os polímeros selecionados no início do estudo. A borracha de pneus usados (CR) foi utilizada numa fase posterior do trabalho após análise da literatura e do facto da mesma ser um resíduo com propriedades diferentes do HDPE. No entanto, algumas das suas características também elas importantes para a produção dos betumes modificados serão mencionadas nesta fase do trabalho. Tal como mencionado na sua caracterização térmica, o HDPE tem uma temperatura de fusão na ordem dos 131 °C. Por sua vez, o SBS começa a reduzir a sua viscosidade a partir da sua temperatura mais elevada de transição vítrea (aos 77 °C), enquanto uma grande parte da borracha (cerca de 35%) nunca irá interagir com o betume independentemente da temperatura, tendo em conta os resultados da análise TGA.

No que diz respeito à temperatura de digestão, devido à dificuldade de dispersão do copolímero SBS no betume modificado (Costa *et al.*, 2013b) e, uma vez que a utilização de temperaturas inferiores a 190 °C minimiza a degradação térmica do polímero (Becker *et al.*, 2001), selecionou-se a temperatura de digestão de 180 °C. Para além disso, o ensaio de estabilidade ao armazenamento refere a temperatura

de 180 °C para avaliar os betumes modificados, o que indica que esta é uma das temperaturas mais utilizadas para esse fim. No caso da borracha, a mesma gama de temperaturas costuma ser utilizada no processo de modificação de betumes borracha de acordo com a literatura (Lo Presti, 2013, Peralta *et al.*, 2012).

Relativamente ao tempo de digestão e ao tipo de equipamento usado para a preparação dos betumes, estes foram definidos avaliando a dispersão dos polímeros no betume através do ensaio de Microscopia de Fluorescência. Devido às propriedades fluorescentes dos polímeros, estes aparecem nas imagens como pontos de luz sobre um fundo escuro que corresponde ao betume. Para além disso, também se avaliou a dispersão dos polímeros no betume através da realização do ensaio de estabilidade ao armazenamento.

Os betumes com 10% de óleo de motor usado e 5% de polímero foram produzidos com diferentes misturadores, nomeadamente um misturador de baixo corte (IKA RW 20 a 350 rpm) e um misturador de alto corte (IKA T 65 D ULTRA-TURRAX a 6000-7200 rpm) até apresentar uma aparência homogênea a olho nu. Em seguida as amostras foram colocadas numa lamela de vidro até formar um filme delgado e examinadas à temperatura ambiente, através de um microscópio *Olympus* BH2-RFCA, incorporado com luz ultravioleta. Neste ensaio, as imagens foram obtidas por uma câmara de microscopia *Leica* DFC3000 G.

A aparência homogênea (a olho nu) com o misturador de baixo e alto corte ocorre, respetivamente, após 60 minutos ou 20 minutos. De salientar que para facilitar a digestão do polímero no misturador de baixo corte utilizou-se polímero moído com dimensão inferior a 0,45 mm. Contudo, no misturador de alto corte usou-se polímero com dimensão máxima de 4 mm (em grânulos), pois este permite reduzir e dissolver o polímero por corte mecânico e hidrodinâmico, reduzindo os custos de preparação prévia dos polímeros (moagem).

Como se pode verificar na Figura 4.4a e na Figura 4.5a, os betumes produzidos com o misturador de baixo corte e polímero moído (inferior a 0,45 mm) apresentam partículas aglomeradas, ao invés de pequenas partículas dispersas no betume. Este comportamento permite constatar que apesar dos polímeros não ficarem visíveis após modificação, o polímero não se encontra disperso no betume de forma homogênea.

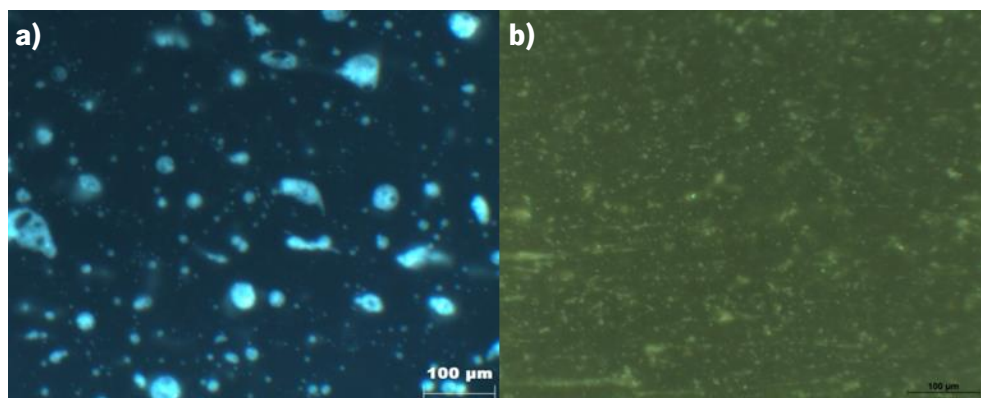


Figura 4.4. Microscopia de fluorescência dos betumes com 10% de óleo de motor usado e 5% de HDPE produzidos com (a) misturador de baixo corte e (b) misturador de alto corte.

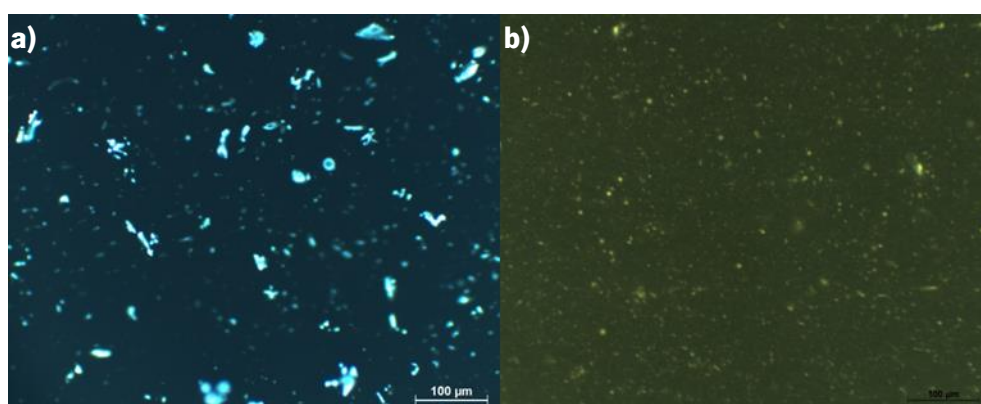


Figura 4.5. Microscopia de fluorescência dos betumes com 10% de óleo de motor usado e 5% de SBS produzidos com (a) misturador de baixo corte e (b) misturador de alto corte.

Todavia, os betumes modificados produzidos com o misturador de alto corte e com polímero em grânulos (dimensão máxima de 4 mm), Figura 4.4b e Figura 4.5b, exibem uma dispersão mais eficaz e uniforme do polímero no betume. As partículas de polímero não se aglomeraram, tornaram-se menores, e todo o betume é um meio contínuo preenchido de forma uniforme por pequenas partículas de polímero em suspensão. Pode ainda constatar-se que o tipo de polímero (HDPE ou SBS) não tem uma influência significativa na dispersão das partículas em suspensão no betume.

Para além da microscopia, o ensaio de estabilidade ao armazenamento também poderá dar indicação da eficácia ou não da dispersão do polímero no betume. O principal problema dos betumes modificados prende-se com a dissociação dos seus constituintes, isto é, os polímeros separam-se do betume e normalmente tendem a deslocar-se para o topo do betume (devido à sua menor densidade). Esta propriedade tem especial importância na medida em que os betumes modificados devem ser estáveis ao armazenamento para futura comercialização. De acordo com a EP (2009), nesse ensaio os betumes

modificados devem apresentar uma variação de penetração e temperatura de amolecimento, entre o topo e base, inferior a $9 \times 0,1$ mm e 5°C , respetivamente.

Segundo a norma EN 13399, a estabilidade ao armazenamento é avaliada colocando uma mistura homogénea de betume modificado num tubo de alumínio, que posteriormente é selado e armazenado a 180°C durante 72 horas. Após o armazenamento, as amostras são divididas em 3 partes iguais, mas apenas o topo e a base são caracterizadas através do ensaio de penetração e temperatura de amolecimento.

No estudo de Costa *et al.* (2013b), um betume B35/50 foi modificado com 5% de polímero num misturador de baixo corte, durante 60 min, a uma temperatura de 180°C . Vários polímeros foram estudados, tais como o HDPE, o SBS e a CR, também avaliados neste trabalho. Os polímeros apresentavam uma dimensão máxima de 0,45 mm e, para além disso, os polímeros HDPE e CR utilizados também eram resíduos. Os betumes modificados com 5% de HDPE ou 5% de SBS do estudo de Costa *et al.* (2013b) não apresentaram estabilidade ao armazenamento, exibindo variações de temperatura de amolecimento e de penetração superiores às requeridas para betumes modificados.

Uma vez que as condições de produção, tempo e temperatura de digestão, tipo de equipamento, betume convencional a modificar, bem como o tipo, dimensão e percentagem de polímero utilizado no estudo supracitado são iguais às deste estudo e pelo facto de os betumes modificados não serem estáveis ao armazenamento, optou-se por avaliar se o betume modificado apenas com óleo (sem adição de polímeros) apresenta ou não estabilidade ao armazenamento. Da caracterização do topo e base do betume modificado com 10% de óleo de motor usado constatou-se que a variação de penetração a 25°C e de temperatura de amolecimento foi de $1,2 \times 0,1$ mm e $0,9^\circ\text{C}$, respetivamente. Tendo em conta que estas variações devem ser inferiores a $9 \times 0,1$ mm e 5°C , respetivamente, verifica-se que o betume modificado com 10% de óleo é estável ao armazenamento, revelando propriedades homogéneas (entre o topo e base) após armazenamento. Como tal, a instabilidade ao armazenamento deverá estar mais relacionada com utilização de polímeros do que pela utilização do óleo de motor usado.

Contudo, como neste estudo também se avaliou a produção dos betumes modificados com resíduos num misturador de alto corte, optou-se por avaliar igualmente os betumes modificados por esse processo relativamente à sua estabilidade ao armazenamento. Não se avaliou a estabilidade ao armazenamento do betume modificado com óleo e borracha, uma vez que é do conhecimento generalizado que os

betumes com elevadas percentagens de borrachas não apresentam estabilidade ao armazenamento, sendo apenas produzidos aquando da sua utilização.

Os resultados obtidos da caracterização do topo e base dos betumes modificados com 10% de óleo de motor usado e 5% de polímero (HDPE ou SBS), produzidos no misturador de alto corte, demonstram variações de penetração ($14,1 \times 0,1$ mm e $22,5 \times 0,1$ mm) e de temperatura de amolecimento (68,7 e 66,5 °C) do topo e base superiores às requeridas e, como tal, demonstram instabilidade ao armazenamento.

O facto de os polímeros apresentarem menor densidade do que o betume convencional pode contribuir para que estes ascendam durante o armazenamento. Assim, os betumes modificados com resíduos não exibem estabilidade ao armazenamento, sendo necessária a sua produção aquando da sua utilização, tal como se efetua nos betumes modificados com borracha.

Da análise efetuada é possível concluir que a utilização do misturador de alto corte oferece vantagens, tais como, a redução do tempo de digestão (de 60 min para 20 min), a possibilidade de introduzir polímero em grânulos e, ainda permite uma dispersão do polímero no betume mais eficiente e homogénea. Importa referir que a utilização de polímero em grânulo permite eliminar a moagem do polímero, um processo moroso e de elevados custos. Este processo implica a utilização de um moinho mecânico com baixo rendimento e que necessita de azoto líquido para congelar os polímeros antes do processo de moagem. Como tal, torna-se um processo inexequível quando se pretende produzir betumes economicamente viáveis. Para além disso, a estabilidade ao armazenamento dos betumes modificados não é alcançada nem pelo misturador de alto corte, nem pelo misturador de baixo corte.

Importa ainda salientar que antes do processo de modificação no misturador de alto corte é necessário que o betume, óleo e polímero estejam a uma temperatura de 180 °C para que o misturador consiga funcionar mantendo a temperatura sem necessidade de nenhum tipo de aquecimento. Isto porque durante o corte mecânico e hidrodinâmico do dispersador de alto corte o polímero aquece, facilitando a sua digestão e mantendo o betume à temperatura de digestão.

Assim, o procedimento 1 caracteriza-se pela adição do óleo de motor usado ao betume previamente aquecido a 160 °C, seguindo-se a adição do polímero num misturador de baixo corte e o seu

aquecimento até esta mistura atingir os 180 °C. Em seguida a mistura é colocada no misturador de alto corte (6000-7200 rpm), durante 20 min, a uma temperatura de aproximadamente 180 °C.

Como o principal objetivo deste trabalho é maximizar a percentagem de resíduos e como o óleo de motor usado, comparativamente ao betume, apresenta baixa viscosidade, estudou-se a possibilidade de introduzir primeiro o polímero no óleo de motor usado (para aumentar a sua viscosidade) e, posteriormente, adicionar o betume (procedimento 2).

Ao juntar primeiro o óleo de motor usado e o polímero pretendeu-se melhorar a digestão dos polímeros, e ao mesmo tempo garantir um aumento da viscosidade do óleo antes da sua junção ao betume. A temperatura de digestão e o misturador são os mesmos utilizados no procedimento 1. Após a introdução do polímero no óleo de motor usado (no misturador de baixo corte até atingir os 180 °C), a mistura é colocada no misturador de alto corte onde esteve sujeita a um tempo de digestão de 20 min, seguindo-se da introdução do betume (a 160 °C) e mais 20 min de digestão (tempo mínimo para o betume modificado apresentar homogeneidade).

De salientar que se avaliou a dispersão através do ensaio de microscopia de fluorescência e em betumes com percentagens de óleo e polímero iguais às utilizadas no procedimento 1, para efeitos de comparação. No que concerne à nomenclatura destes betumes, como apenas a ordem foi invertida (os polímeros são os mesmos, assim como as percentagens) os betumes serão denominados de O10H5B e O10S5B.

Da análise microscópica é possível verificar que o betume com óleo e HDPE (Figura 4.6b) exibe uma espécie de rede de polímero, contrariamente às pequenas e dispersas partículas de HDPE do betume BO10H5 do procedimento 1 (Figura 4.6a). Por sua vez, na Figura 4.7b é possível constatar que o betume produzido com o procedimento 2 exibe uma maior dimensão do polímero SBS, apresentando por vezes alguns filamentos.

Desta análise é possível concluir que os betumes modificados do procedimento 2 (Figura 4.6b e Figura 4.7b) apresentam menor dispersão e maior dimensão das partículas de polímero do que os betumes do procedimento 1 (Figura 4.6a e Figura 4.7a). Este facto pode dever-se ao inchamento do polímero devido à modificação inicial apenas com o óleo ou pelo facto do polímero não conseguir interagir tão bem com óleo de motor usado, como interage com o betume e óleo de motor usado.

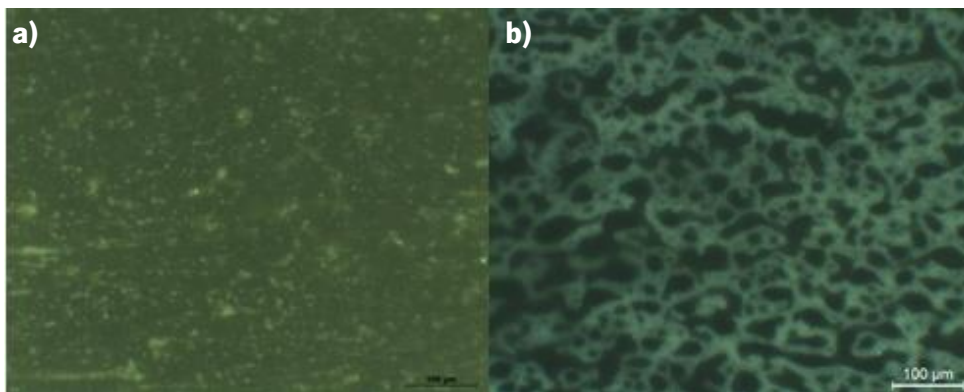


Figura 4.6. Microscopia de fluorescência dos betumes com 10% de óleo de motor usado e 5% de HDPE produzidos com (a) procedimento 1 e (b) procedimento 2.

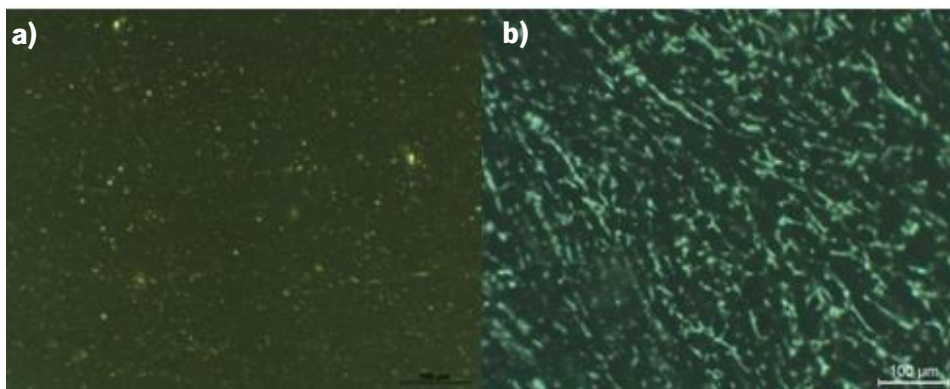


Figura 4.7. Microscopia de fluorescência dos betumes com 10% de óleo de motor usado e 5% de SBS produzidos com (a) procedimento 1 e (b) procedimento 2.

Como tal, tendo em conta que este procedimento implica um maior tempo de digestão (20 min + 20 min), não permite uma dispersão eficiente do polímero e, ainda que reduzidas, poderão existir perdas de massa no processo de mistura do óleo de motor usado e polímero, optou-se por seleccionar o procedimento 1 para o resto do estudo.

4.2.2. Influência da quantidade de óleo de motor usado e polímeros nas propriedades básicas do betume

Após seleção do procedimento de produção dos betumes modificados, vários betumes modificados foram produzidos e caracterizados, com o objetivo de maximizar a utilização de resíduos e obter betumes modificados com características similares ao betume PMB45/80-60 usado como referência.

As percentagens de SBS e HDPE mais utilizadas na modificação de betumes encontram-se compreendidas entre 3% a 7% (Attaelmanan *et al.*, 2011, Dehouche *et al.*, 2012), mas nas últimas décadas as percentagens mais utilizadas foram 5% e 6% (Kalantar *et al.*, 2012).

Contudo, no caso da borracha de pneus usados (CR) é possível adicionar quantidades muito superiores (até cerca de 20%) no processo de modificação de betumes (Kök e Çolak, 2011, Lo Presti, 2013, Peralta *et al.*, 2013, Sarang *et al.*, 2015b).

Com base na literatura definiu-se a principal gama de percentagens de incorporação de polímeros entre 4% a 6% para o SBS e HDPE e entre 5% a 20% no caso da CR.

No caso do óleo de motor usado foram avaliadas várias percentagens, nomeadamente entre os 5% e 20%. Apesar de se ter avaliado percentagens baixas, a combinação de óleo de motor usado e polímero permite a utilização de percentagens mais elevadas de óleo de motor. Como tal, as percentagens de óleo de motor mais estudadas foram sempre superiores a 7,5%.

Tendo em conta que o objetivo é maximizar o uso de resíduos, o HDPE e a CR, ambos resíduos, foram avaliados de forma mais exaustiva nas percentagens mais elevadas 6% (HDPE), 15 e 20% (CR). No caso do SBS, como não se trata de um resíduo, avaliou-se de forma mais detalhada a percentagem mais comum utilizada na modificação, ou seja, 5%. Para estas percentagens de polímero, praticamente todas as percentagens de óleo de motor usado foram estudadas.

No que concerne à nomenclatura dos betumes modificados com resíduos e, tal como já se pode constatar em alguns betumes anteriormente mencionados, esta segue a estrutura “BaXbY” em que:

a – pode ser substituído pela letra O (Óleo de motor usado) ou F (Fundo de coluna);

X – percentagem utilizada de substituto parcial;

b – pode ser substituído pela letra H (HDPE), S (SBS) ou R (CR); e,

Y – percentagem utilizada de polímero.

A combinação e quantidades de cada material utilizado na modificação do betume convencional podem ser observadas na Figura 4.8.

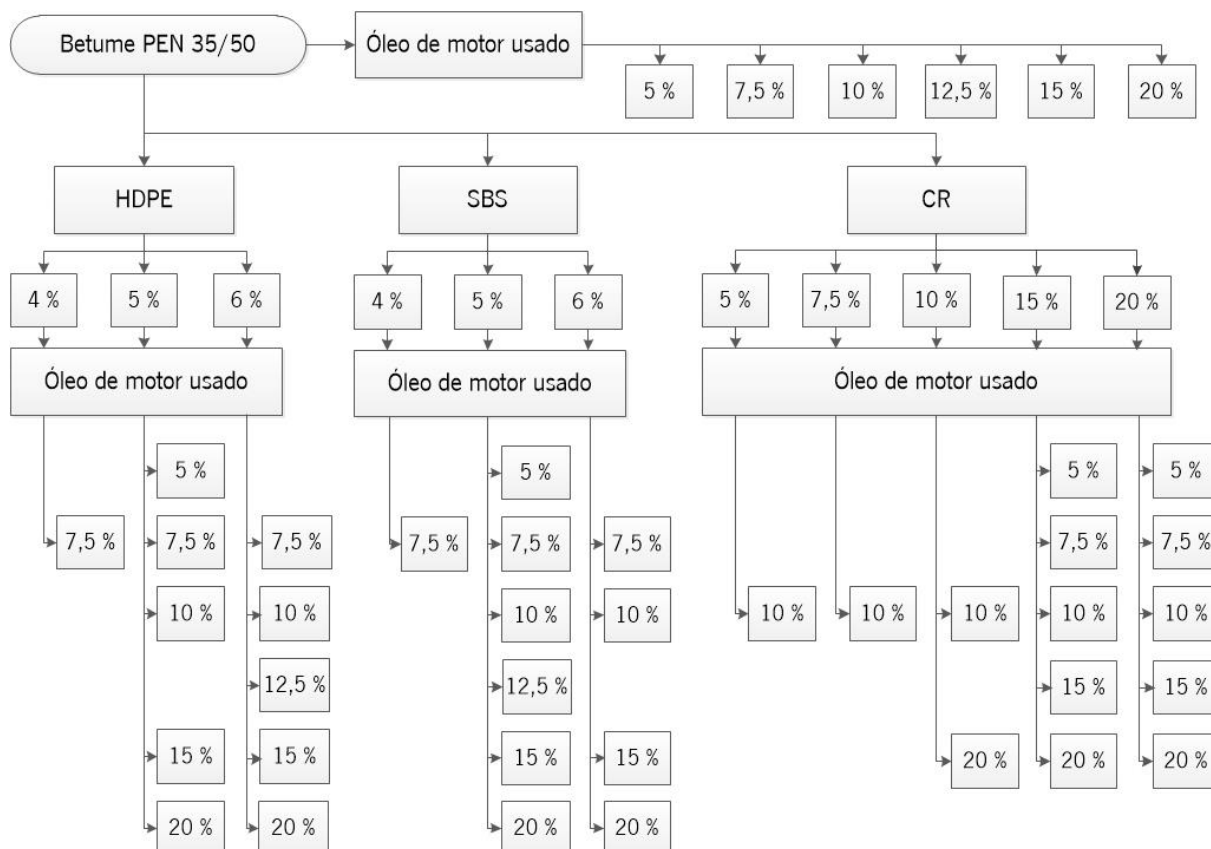


Figura 4.8. Tipo e percentagens dos materiais usados para a modificação do betume convencional.

Após produção dos vários betumes modificados com óleo de motor usado e polímeros, estes foram caracterizados através dos ensaios de penetração a 25 °C (norma EN 1426), temperatura de amolecimento (norma EN 1427) e resiliência (EN 13880-3), tal como mencionado anteriormente. Como se produziram vários betumes modificados com óleo de motor usado e polímeros foi possível obter, através do *software Origin*, gráficos de contorno e área das propriedades mencionadas.

Os gráficos de contorno e área para o HDPE (Figura 4.9), SBS (Figura 4.11) e CR (Figura 4.13) mostram a evolução das propriedades do betume tendo em conta a incorporação de diferentes quantidades de óleo de motor usado e polímero no betume convencional.

Este tipo de gráficos apresenta como principal vantagem o facto de mostrar qual o aditivo (óleo de motor usado ou polímero) que tem maior influência nas propriedades dos betumes modificados, assim como, zonas de transição para seleção de percentagens ótimas de cada modificador e possíveis combinações que podem ser usados para outros fins.

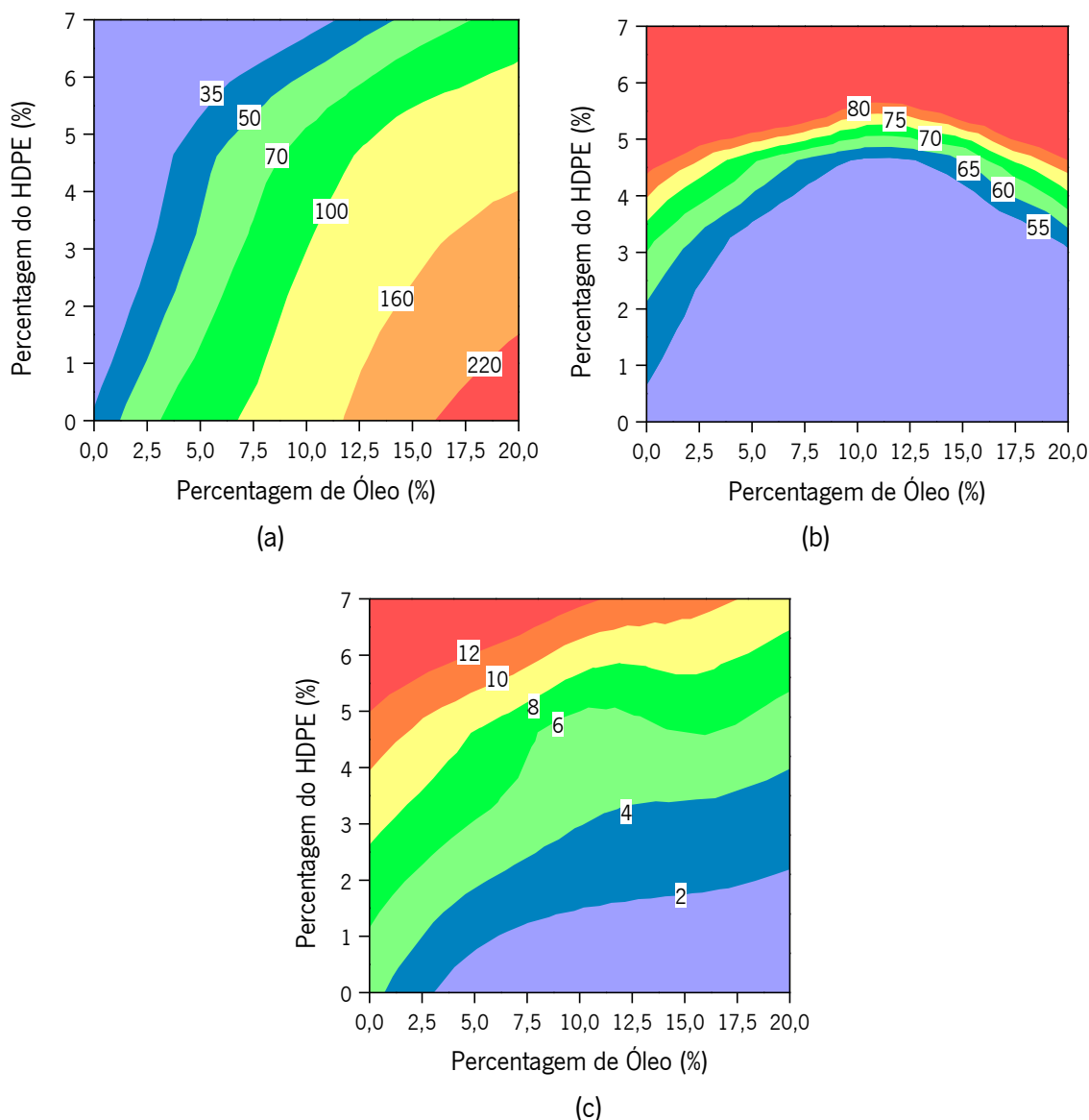


Figura 4.9. Influência da variação das percentagens de óleo de motor usado e HDPE nas seguintes propriedades: (a) penetração (0,1 mm); (b) temperatura de amolecimento (°C); (c) resiliência (%).

Desta forma, na Figura 4.9a e Figura 4.9b é possível verificar que a quantidade de óleo de motor usado tem maior influência nos valores de penetração (as linhas de contorno tendem a aproximar-se da vertical) do que nos valores de temperatura de amolecimento. A temperatura de amolecimento é mais influenciada pela quantidade de polímero adicionado, no caso do HDPE, do que pela quantidade de óleo de motor usado (as linhas de contorno tendem a assumir uma posição horizontal). Para além disso, os valores de penetração aumentam com maiores quantidades de óleo de motor usado e diminuem para maiores quantidades de HDPE. Por outro lado, as temperaturas de amolecimento aumentam com a crescente quantidade de HDPE. No caso dos resultados de resiliência (Figura 4.9c), esta propriedade é

influenciada quer pela quantidade de óleo de motor usado, quer pela quantidade de HDPE, uma vez que as linhas de contorno não tendem nem para a horizontal, nem para a vertical.

A curvatura verificada na Figura 4.9b para uma percentagem de cerca de 12,5% indica uma zona de transição nas temperaturas de amolecimento. Esta zona de transição significa que a interação entre o óleo de motor usado e o HDPE sofre uma alteração neste ponto, o que poderá indicar que se trata da quantidade de óleo de motor usado necessária para facilitar a dispersão do HDPE no betume. Este tipo de transição é também visível na Figura 4.9a para percentagens de HDPE entre 5% e 6%, confirmando os típicos valores apresentados por Kalantar *et al.* (2012) para a modificação de betumes com polímeros.

Relativamente aos resultados de viscosidade dinâmica dos betumes modificados com óleo de motor usado e HDPE (Figura 4.10) verifica-se que o aumento da percentagem de HDPE tende a aumentar a viscosidade dos betumes. Por sua vez o aumento da quantidade de óleo de motor usado, para a mesma quantidade de polímero provoca a diminuição da viscosidade dos betumes modificados. Para além disso verifica-se que a para percentagens de 6% de HDPE as viscosidades são muito semelhantes (ainda que reduzam com o aumento da quantidade de óleo de motor) o que poderá indicar que esta propriedade é mais influenciada pela quantidade de polímero do que pela quantidade de óleo de motor usado. Importa salientar que a viscosidade dinâmica do betume B020H5 não apresenta as tendências previamente mencionadas o que poderá estar relacionado com as zonas de transição referidas na análise dos resultados de penetração e temperatura de amolecimento.

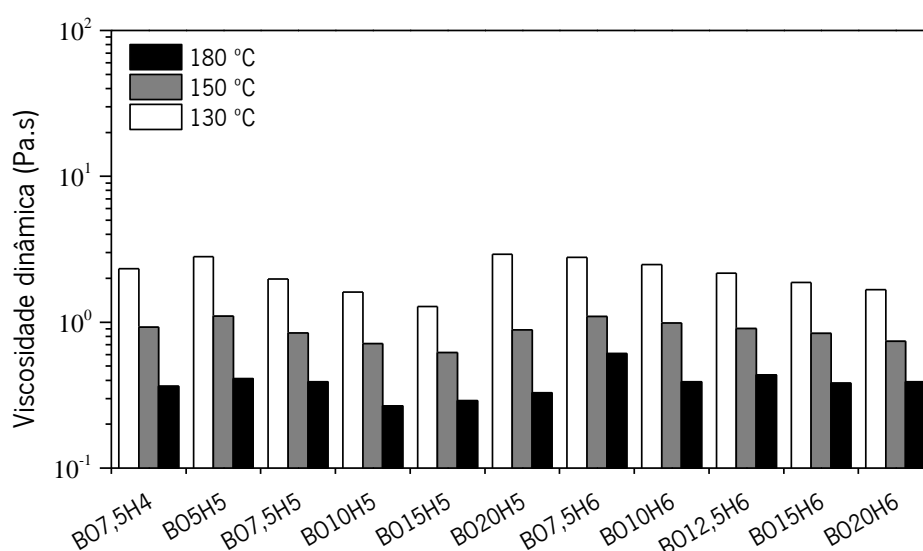


Figura 4.10. Viscosidade dinâmica dos betumes modificados com óleo de motor usado e HDPE.

No que concerne aos resultados obtidos para os betumes modificados com óleo de motor e SBS, a forma das linhas de contorno para os valores de penetração (Figura 4.11a) são muito similares às observadas nos betumes modificados com HDPE. Isto é, os valores de penetração estão muito mais relacionados com a percentagem de óleo de motor usado do que com a quantidade de SBS usada. A zona de transição dos valores de penetração dos betumes modificados com óleo de motor usado e SBS ocorre, tal como nos betumes modificados com óleo de motor usado e HDPE, nas percentagens de 5% e 6% de polímero.

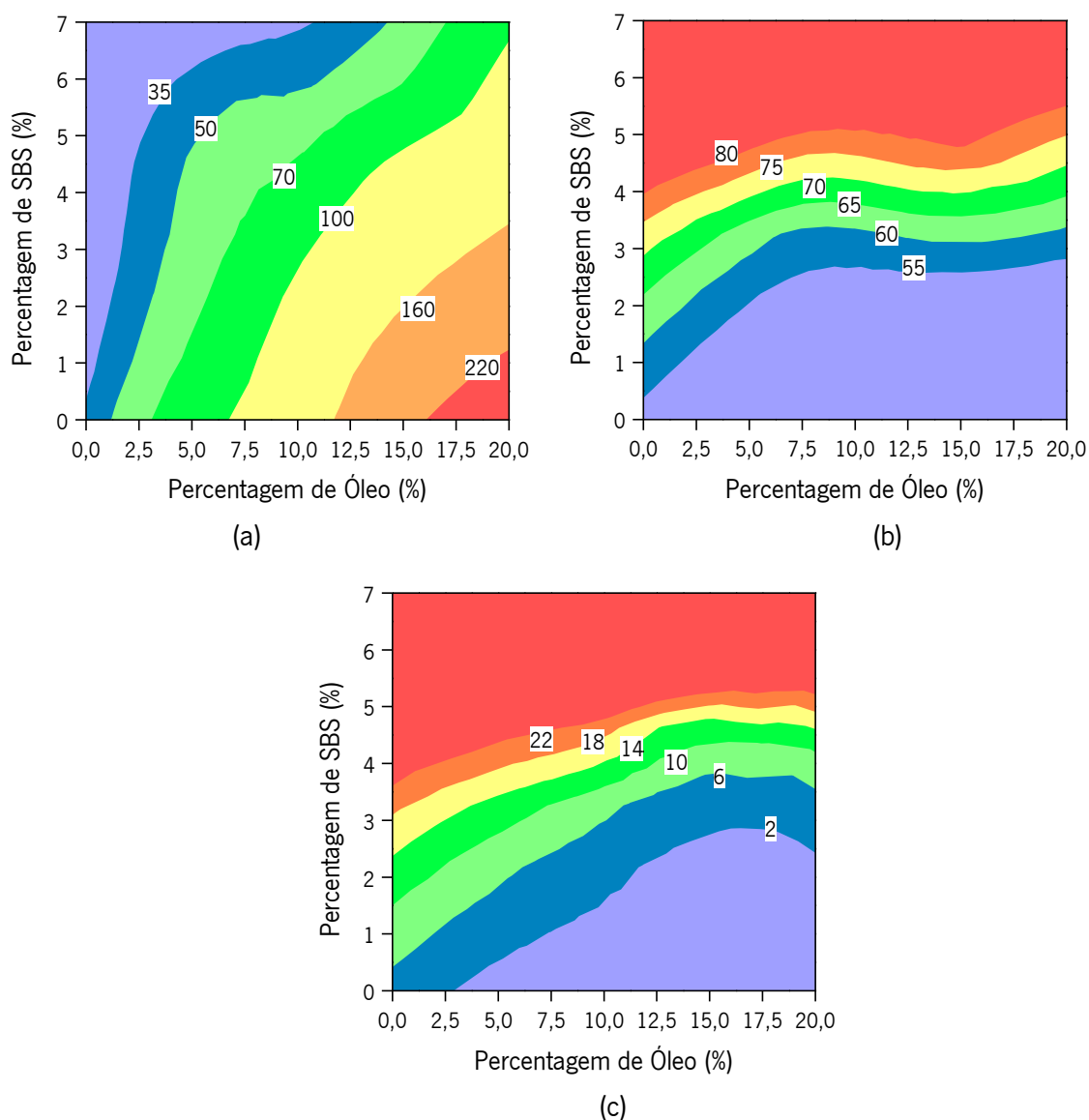


Figura 4.11. Influência da variação das percentagens de óleo de motor usado e SBS nas seguintes propriedades: (a) penetração (0,1 mm); (b) temperatura de amolecimento ($^{\circ}\text{C}$); (c) resiliência (%).

Por outro lado, a quantidade de SBS tem muito maior efeito nas temperaturas de amolecimento, bem como, na resiliência destes betumes (Figura 4.11b e Figura 4.11c). A percentagem de aproximadamente

7,5% de óleo de motor usado define a zona de transição acima da qual a temperatura de amolecimento é praticamente influenciada apenas pela quantidade de óleo de motor usado. No caso da resiliência, a percentagem de óleo de motor usado a que corresponde o início da zona de transição (onde a resiliência apenas depende da percentagem de óleo de motor usado) é 15%. Aliado a isso e quando comparados com os resultados de resiliência dos betumes com HDPE, verifica-se que a adição de um elastómero (SBS) aumenta a capacidade resiliente dos betumes, apesar da introdução de óleo de motor usado e da menor quantidade de polímero utilizado. Este comportamento poderá indicar uma maior flexibilidade das misturas que utilizem este tipo de polímero e, consequentemente uma maior vida à fadiga.

Tal como se verificou nos betumes modificados com óleo de motor e HDPE, a viscosidade dinâmica dos betumes com SBS é tanto maior quanto maior for a quantidade de polímero usada, conforme se pode observar na Figura 4.12. No caso dos betumes com SBS, surge uma zona de transição na percentagem de óleo de motor de 10%, onde ocorrem, para a mesma quantidade de polímero, os valores máximos de viscosidade. Esta percentagem poderá ser a percentagem onde a dispersão do polímero no betume e óleo de motor usado é mais efetiva/eficaz.

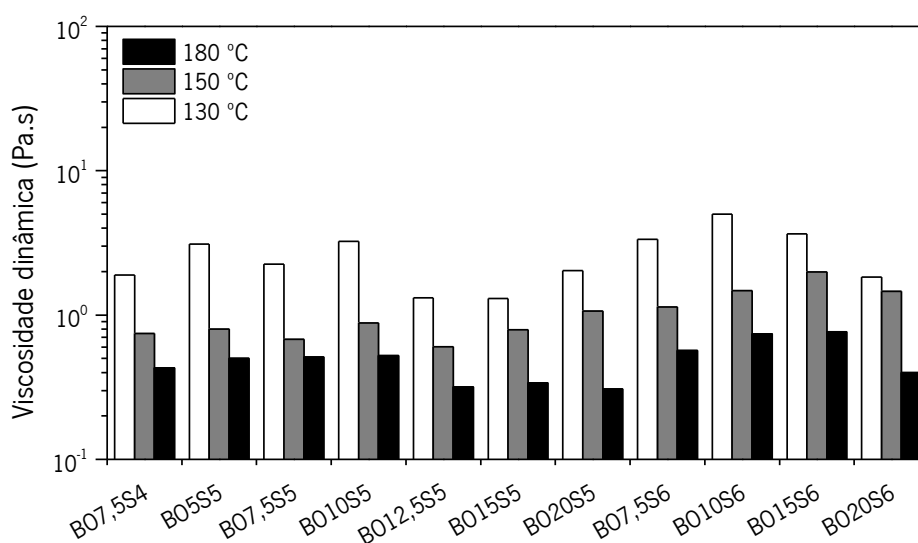


Figura 4.12. Viscosidade dinâmica dos betumes modificados com óleo de motor usado e SBS.

A influência da quantidade de óleo de motor usado e da quantidade de CR usada nas diferentes propriedades básicas dos betumes, penetração a 25 °C, temperatura de amolecimento e resiliência pode ser observada na Figura 4.13.

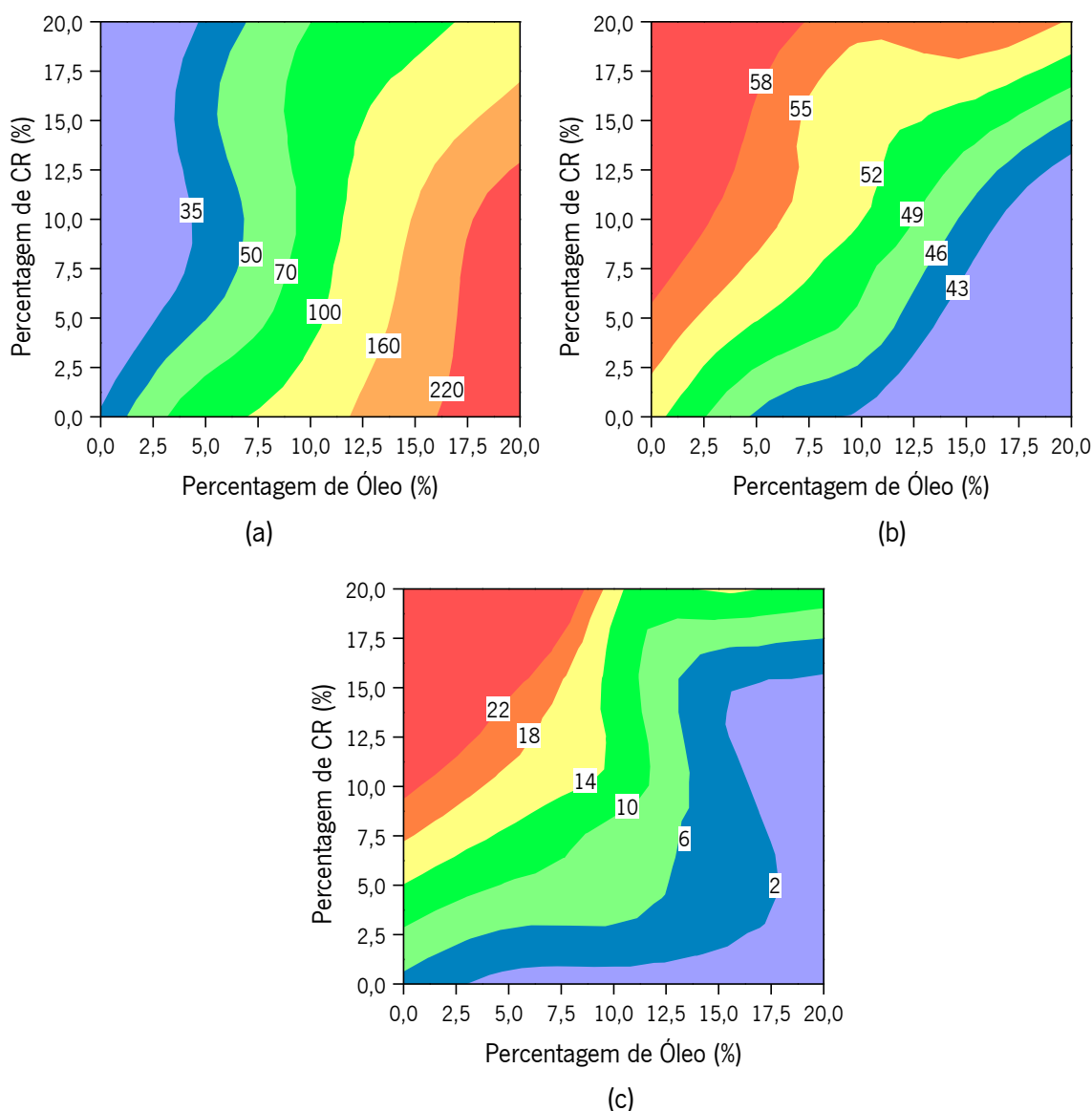


Figura 4.13. Influência da variação das percentagens de óleo de motor usado e CR nas seguintes propriedades: (a) penetração (0,1 mm); (b) temperatura de amolecimento (°C); (c) resiliência (%).

Tal como foi observado nos betumes anteriores, a evolução dos valores de penetração dos betumes modificados com óleo de motor usado e CR (Figura 4.13a) estão mais relacionadas com variação da quantidade de óleo de motor usado. Contudo, contrariamente ao verificado nos betumes com HDPE e SBS, a temperatura de amolecimento (Figura 4.13b) é igualmente influenciada pela quantidade de óleo de motor usado e CR (as linhas de contorno têm uma inclinação de cerca de 45°).

Este facto poderá indicar que a borracha de pneu não tem tanta interação com o betume/óleo de motor como o HDPE ou SBS, atuando mais como filler, logo com muito menos influência no desempenho dos betumes a temperaturas elevadas. Além disso, as temperaturas de amolecimento são muito menores do

que a dos betumes com HDPE e SBS, o que aponta para um pior desempenho à deformação permanente comparativamente com os betumes modificados com SBS e HDPE. A fase de transição neste tipo de betumes aparentemente ocorre nos betumes que combinam 7,5% a 10% de óleo de motor usado com elevadas percentagens de CR (17,5% a 20%).

Relativamente aos valores de resiliência (Figura 4.13c), verificam-se três comportamentos diferentes: até à primeira zona de transição um comportamento igualmente dependente da quantidade de óleo de motor usado e da quantidade de CR; entre a primeira e segunda zona de transição um comportamento mais influenciado pela quantidade de óleo de motor usado; e, após a segunda zona de transição o comportamento depende exclusivamente da percentagem de borracha. De salientar que a primeira fase ocorre para as combinações de óleo de motor usado entre 10% e 17,5% com baixas percentagens de CR (5% e 10%), enquanto a segunda zona de transição ocorre para elevadas percentagens de CR (15% a 20%) e percentagens de óleo de motor compreendidas entre 10% e 15%.

As viscosidades dinâmicas dos betumes modificados com óleo de motor e CR podem ser visualizadas na Figura 4.14. Como se pode constatar nessa figura, o aumento da quantidade de CR tende a aumentar a viscosidade do betume modificado, tal como se verificou nos betumes com HDPE e SBS. Não obstante, para a mesma quantidade de CR, verifica-se que o aumento da quantidade de óleo motor usado tende a diminuir a viscosidade até atingir os 10% de óleo de motor. A viscosidade aumenta entre os 10% e 15%, voltando a diminuir acima desse valor. Tal facto poderá dever-se a uma zona de transição entre as percentagens de 10% e 15% de óleo de motor usado.

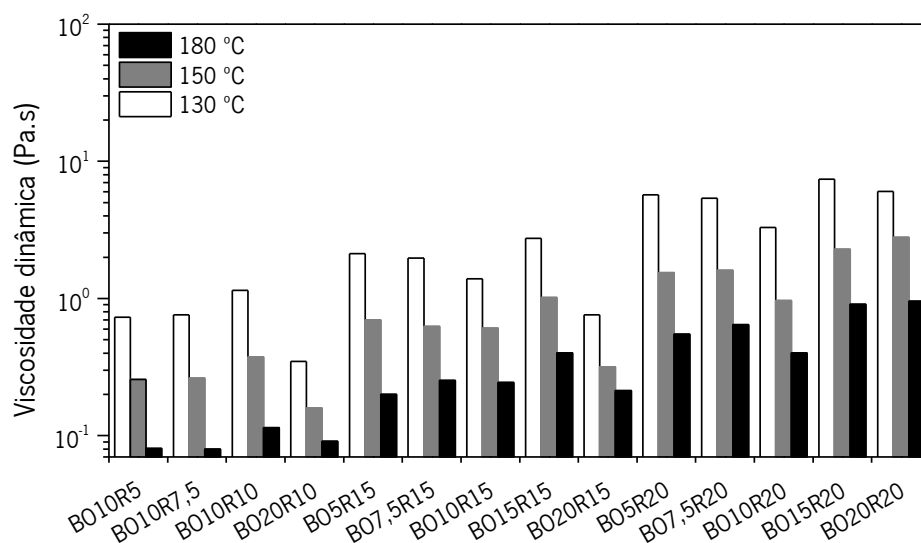


Figura 4.14. Viscosidade dinâmica dos betumes modificados com óleo de motor usado e CR.

Deste modo, verifica-se que a adição de óleo de motor usado exerce maior influência nos valores de penetração, enquanto a quantidade de polímero tem maior impacto na temperatura de amolecimento e na viscosidade dinâmica. A resiliência, no geral é afetada pela combinação dos dois aditivos, isto é, da quantidade de óleo de motor usado e de polímero. Assim, dependendo da finalidade a que os betumes modificados se destinam (novas misturas ou misturas recicladas) e do tipo de polímero a usar, as combinações ótimas dos diferentes aditivos podem variar.

Caso o betume modificado seja utilizado em misturas betuminosas convencionais (sem material reciclado), a quantidade de óleo de motor usado não deve ser muito elevada. No entanto, caso sejam utilizados em misturas recicladas (onde é necessário um betume com elevada penetração para adicionar ao material fresado), as percentagens de óleo de motor usado poderão ser significativamente superiores às utilizadas em misturas convencionais. No que concerne à seleção da percentagem mais indicada de polímero é importante ter em conta se é um resíduo ou não. No caso do HDPE e CR a percentagem deverá ser maximizada, enquanto no caso do SBS esta deve ser minimizada pelo facto de este polímero não ser um resíduo.

4.3. Seleção dos betumes modificados com resíduos mais promissores

4.3.1. Betumes modificados com óleo de motor usado e polímeros

Para a escolha das melhores combinações de betume, óleo de motor usado e polímero destes novos betumes modificados foi usado para comparação o betume modificado comercial PMB45/80-60 (o seu valor de penetração 50×0,1 mm foi usado com objetivo). Para além disso, estes novos betumes modificados devem cumprir os limites do betume modificado PMB45/80-60 impostos pela norma EN14023 e maximizar a quantidade de resíduos na sua constituição.

Tendo em atenção as condições previamente mencionadas, três betumes modificados com 10%, 12,5% e 15% de óleo de motor usado e 6% de HDPE (B010H6, B012,5H6 e B015H6, respetivamente), dois betumes modificados com 7,5% e 10% de óleo de motor usado e 5% de SBS (B07,5S5 e B010S5) e dois betumes modificados com 5% e 7,5% de óleo de motor usado e 15% ou 20% de CR (B05R15 e B07,5R20) foram selecionados para uma caracterização mais avançada (caracterização reológica). Esta caracterização irá permitir selecionar posteriormente os betumes modificados com as características mais promissoras.

Importa ainda referir que os betumes modificados com borracha apresentam baixas temperaturas de amolecimento, até mesmo inferiores às temperaturas de amolecimento requeridas na norma EN 14023 (60 °C de acordo com as condições portuguesas). Como tal, seleccionou-se os betumes com borracha cujos valores de penetração mais se aproximavam do valor de penetração do betume modificado comercial utilizado para efeitos de comparação.

Tal como se pode observar na Figura 4.15, os betumes modificados com óleo de motor e polímeros exibem valores de módulo complexo mais elevados a temperaturas mais elevadas (baixas frequências), assim como, módulos complexos próximos ou inferiores a temperaturas mais baixas (elevadas frequências) comparativamente ao betume B35/50. Este facto indica que este tipo de betumes apresenta uma menor suscetibilidade térmica e, consequentemente um desempenho mais promissor numa gama de temperaturas de serviço maior. Importa ainda salientar que o betume modificado com 12,5% de óleo de motor e 6% de HDPE exhibe a menor suscetibilidade térmica, tendo em conta a baixa inclinação que a curva exhibe.

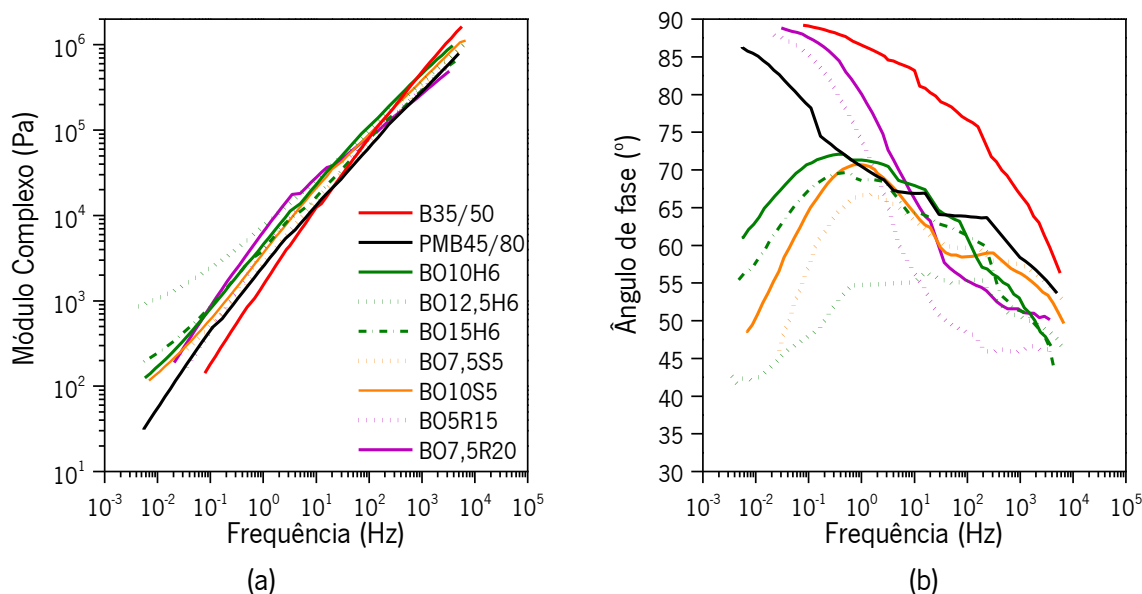


Figura 4.15. Curvas mestre ($T_{ref}=60\text{ °C}$) do (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase dos betumes de controlo e betumes modificados com óleo de motor usado seleccionados.

Por sua vez, as curvas mestras dos ângulos de fase destes betumes modificados são inferiores ao betume de controlo B35/50, em toda a gama de frequências e temperaturas estudadas. Para além disso, quando comparados com o betume modificado comercial PMB45/80 verifica-se que os betumes modificados com HDPE e SBS exibem ângulos de fase inferiores em praticamente todas as frequências. No caso dos

betumes com borracha, estes exibem ângulos de fase inferiores apenas para temperaturas intermédias e baixas (frequências intermédias e elevadas). A utilização de óleo de motor e polímeros reduz a natureza viscosa do betume convencional, contribuindo para uma maior flexibilidade dos betumes a baixas temperaturas.

As temperaturas mais elevadas do grau PG dos betumes de controlo, bem como dos betumes modificados com óleo de motor usado e polímeros podem ser observadas no Quadro 4.2.

Pode assim verificar-se que a adição de diferentes resíduos aumenta a temperatura mais elevada do grau PG dos betumes, o que poderá indicar um melhor desempenho destes betumes numa maior gama de temperaturas de serviço comparativamente aos betumes de controlo.

Quadro 4.2. Temperatura mais elevada do grau PG dos betumes de controlo e betumes modificados com óleo de motor usado selecionados.

Betumes	Temperatura máxima do grau PG
B35/50	64
PMB45/80	70
B010H6	76
B012,5H6	82
B015H6	76
B07,5S5	76
B010S5	76
B05R15	70
B07,5R20	76

Com exceção do betume modificado com 5% de óleo de motor usado e 15% de CR, todos os betumes modificados com óleo de motor e polímeros apresentam temperaturas mais elevadas do grau PG maiores do que a do betume modificado comercial (PMB45/80), o que pode indicar uma maior resistência à deformação permanente do que o betume modificado de controlo. Como tal, a introdução de polímero afeta de forma muito positiva a temperatura máxima do grau PG e, consequentemente a possível resistência à deformação permanente, apesar da introdução do óleo de motor usado.

O parâmetro de deformação não recuperada obtido através do ensaio de fluência e relaxamento é um indicador da resistência à deformação permanente sob cargas repetidas e deve apresentar o menor valor possível para indicar um bom desempenho.

Da análise da Figura 4.16 é possível constatar que os betumes modificados com óleo de motor usado e polímeros apresentam valores do parâmetro de deformação não recuperada inferiores ao betume de controlo (B35/50) para todos os níveis de tensão estudados, com exceção do betume com 12,5% de óleo de motor usado e 6% de HDPE (BO12,5H6). Estes resultados poderão indicar que apesar da adição do óleo de motor usado, a resistência à deformação poderá não ficar comprometida.

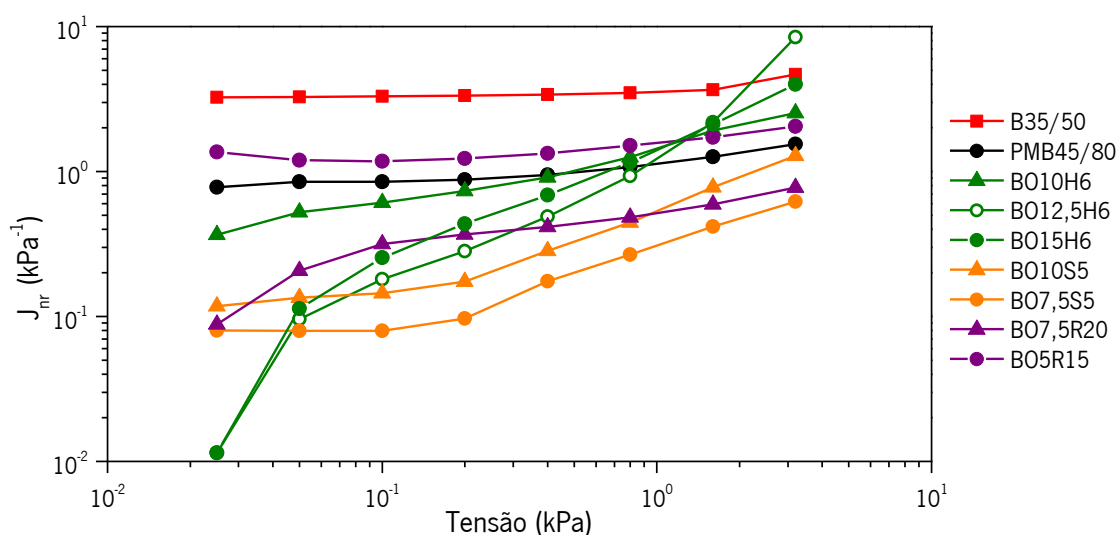


Figura 4.16. Parâmetro de deformação não recuperada (J_{nr}) dos betumes de controlo e betumes modificados com óleo de motor usado selecionados.

Por sua vez os betumes modificados com 12,5% e 15% de óleo de motor usado e 6% HDPE (BO12,5H6 e BO15H6) são muito sensíveis à variação do nível de tensão, uma vez que o parâmetro de deformação não recuperada cresce de forma acentuada com o aumento da tensão aplicada. Para além disso, para tensões superiores a 0,4 kPa, o parâmetro de deformação não recuperada é superior ao betume modificado de controlo (PMB45/80). Apenas o betume com 10% de óleo de motor usado e 6% de HDPE (BO10H6) apresenta uma variação similar aos restantes betume modificados em análise, bem como o menor valor do parâmetro de deformação não recuperada para a tensão mais elevada.

Adicionalmente, os dois betumes com óleo de motor usado e SBS apresentam valores do parâmetro de deformação não recuperada inferiores ao betume modificado de controlo, sendo que um deles apresenta

uma maior quantidade de óleo de motor. Em relação aos betumes modificados com óleo de motor usado e CR, apenas o betume com 7,5% de óleo de motor e 20% de borracha exibe melhores propriedades que o betume modificado de controlo.

Consequentemente, os betumes modificados com óleo de motor e polímeros que apresentam as características mais promissoras na análise reológica efetuada e, como tal, serão selecionados para produção das misturas betuminosas SMA são o betume modificado com 10% de óleo de motor usado e 6% de HDPE (BO10H6), o betume modificado com 10% de óleo de motor usado e 5% de SBS (BO10S5) e o betume modificado com 7,5% de óleo de motor usado e 20% de CR (BO7,5R20).

4.3.2. Betumes modificados com fundo de coluna e polímeros

Após a seleção dos betumes modificados com óleo de motor e polímeros para a produção de misturas betuminosas é necessário proceder-se à seleção dos betumes modificados com fundo de coluna e polímeros. Deste modo, optou-se inicialmente por produzir betumes modificados com fundo de coluna e polímeros com as mesmas percentagens dos betumes com óleo de motor e polímeros selecionados para efeitos de comparação.

Em seguida, e tendo em conta os resultados de viscosidade do betume modificado apenas com fundo de coluna (onde este apresenta maior viscosidade do que o betume modificado apenas com óleo), optou-se por aumentar as percentagens de fundo de coluna até obter um ligante com características semelhantes a um PMB45/80 e similares ao respetivo betume modificado com óleo de motor e polímero. Os diferentes betumes modificados com resíduos foram avaliados através das suas propriedades básicas, nomeadamente penetração a 25°C, temperatura de amolecimento e viscosidade dinâmica.

As propriedades básicas dos betumes modificados com HDPE estão apresentadas na Figura 4.17 e Figura 4.18, para duas percentagens de óleo de motor usado ou fundo de coluna (10% e 15%). O aumento da quantidade de óleo de motor usado e fundo de coluna resulta num aumento dos valores de penetração dos betumes para a mesma quantidade de HDPE. Para além disso, o aumento dos valores de penetração nos betumes modificados com óleo de motor usado e HDPE é mais acentuado do que nos betumes modificados com fundo de coluna e HDPE.

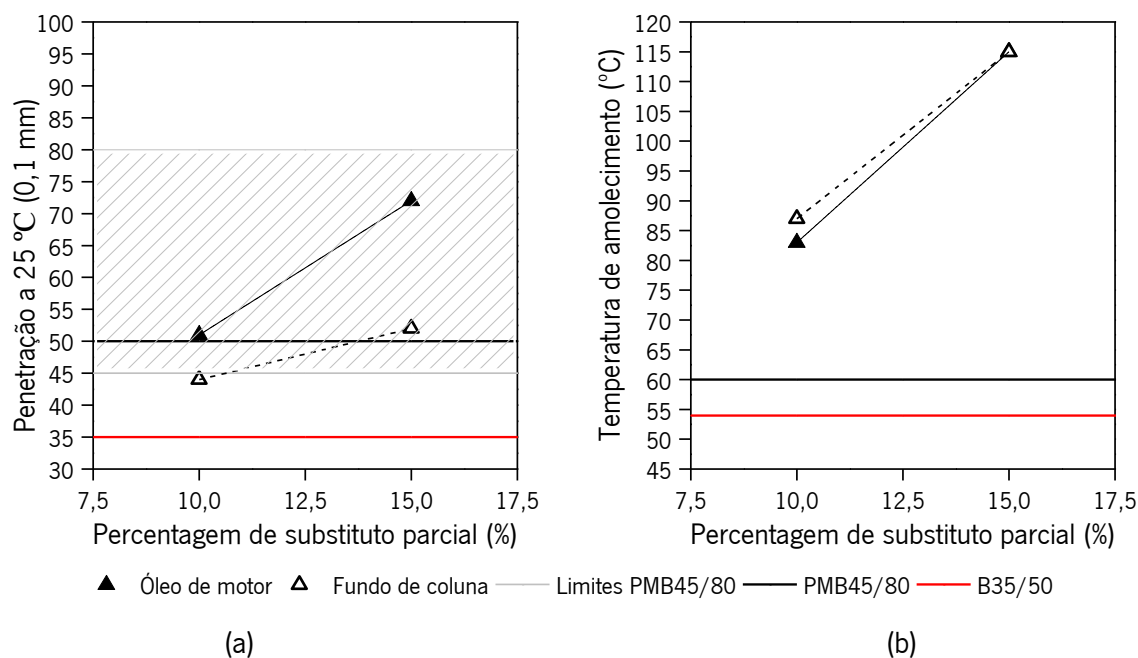


Figura 4.17. Resultados de (a) penetração e (b) temperatura de amolecimento dos betumes modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 6% de HDPE.

Em relação às temperaturas de amolecimento, estas aumentam com o aumento da quantidade de substituto parcial e, para além disso, os valores são muito similares entre si. Este inesperado aumento pode estar relacionado com a elevada quantidade de HDPE utilizada, que poderá necessitar de uma maior proporção de fase líquida (maltenos) para uma dispersão eficaz. Contudo, as temperaturas de amolecimento dos betumes modificados com fundo de coluna e HDPE (assim como os betumes com óleo e HDPE) são superiores às do betume modificado comercial (PMB45/80-60) e do betume convencional (B35/50). Estes elevados valores de temperatura de amolecimento podem ser um indicador de uma elevada resistência à deformação permanente, superior à dos betumes de controlo (B35/50 e PMB45/80-60).

Desta forma, a combinação de fundo de coluna e HDPE que apresenta uma penetração similar ao betume modificado comercial (50×0,1 mm) e, ao mesmo tempo semelhante à do betume BO10H6, é o betume modificado com 15% de fundo de coluna e 6% de HDPE (BF15H6).

No que concerne aos resultados de viscosidade dinâmica (Figura 4.18), os betumes modificados com fundo de coluna e 6% de HDPE apresentam uma viscosidade superior à dos betumes de controlo (PMB45/80 e B35/50) e dos betumes modificados com óleo de motor e HDPE.

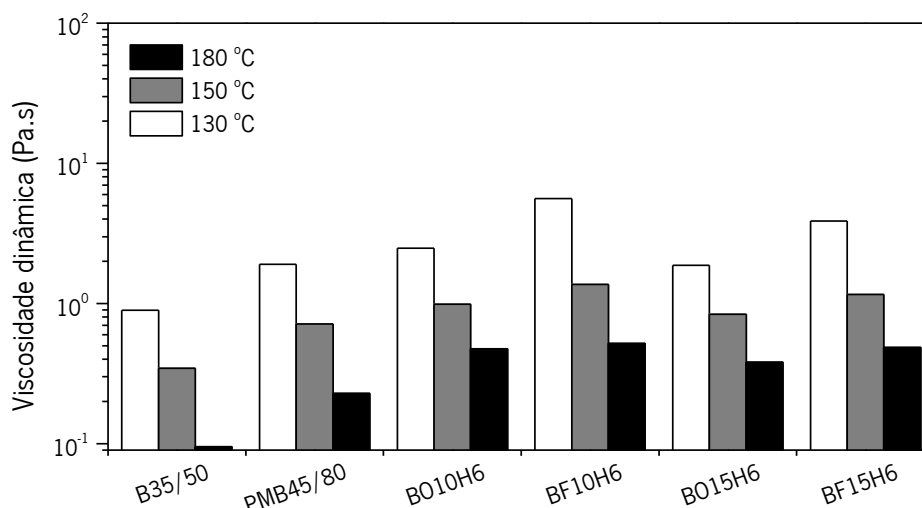


Figura 4.18. Viscosidade dinâmica dos betumes modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 6% de HDPE.

Adicionalmente, pode ainda referir-se que estes betumes modificados apresentam elevadas temperaturas de produção (cerca de 180 °C ou superior) devido à elevada percentagem de HDPE utilizada. Com base nos resultados, a temperatura de compactação das misturas produzidas com este tipo de betumes modificados deverá ser cerca de 135 °C ou ligeiramente superior. Deste modo, como a temperatura de compactação é superior à temperatura de fusão do polímero HDPE é possível garantir uma correta compactação da mistura, uma vez que o polímero encontra-se completamente fundido aquando do processo de compactação. No entanto é necessário ter um cuidado especial em obra na aplicação deste tipo de misturas para garantir a correta compactação às temperaturas indicadas.

O mesmo tipo de análise foi realizado com os restantes polímeros em estudo. Como tal, as propriedades básicas dos betumes modificados com SBS podem ser visualizadas na Figura 4.19 e Figura 4.20, para três percentagens de óleo de motor usado ou fundo de coluna (10%, 12,5% e 15%).

Mais uma vez, o aumento da quantidade de óleo de motor usado ou fundo de coluna aumenta os valores de penetração dos betumes modificados com 5% de SBS. Contudo, neste caso o aumento dos valores de penetração é mais pronunciado do que nos betumes com 6% de HDPE. Esta diferença pode estar relacionada com a menor quantidade ou com o tipo de polímero utilizado na modificação. Para além disso, os valores de penetração dos betumes com SBS e óleo de motor usado são tipicamente superiores aos betumes que incorporam fundo de coluna (para as mesmas percentagens de óleo de motor e fundo

de coluna). Deste modo, maiores quantidades de fundo de coluna podem ser usadas para produzir betumes com SBS que cumpram os limites de um betume modificado comercial PMB45/80.

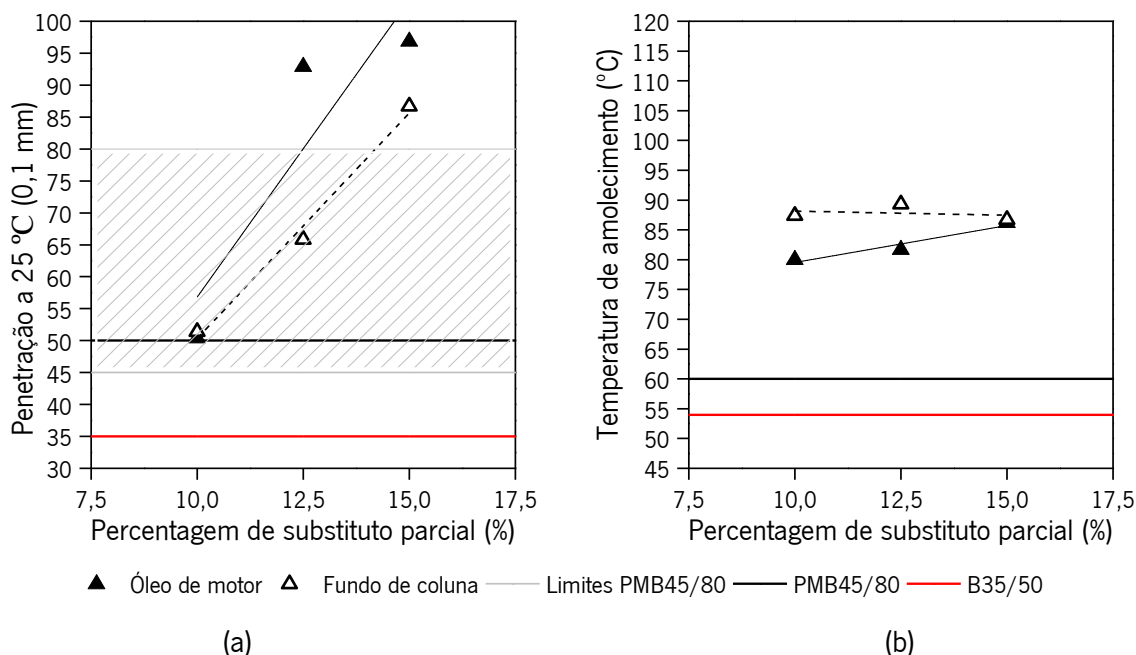


Figura 4.19. Resultados de (a) penetração e (b) temperatura de amolecimento dos betumes modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 5% de SBS.

Em relação às temperaturas de amolecimento, estas são mais uma vez superiores aos betumes de controlo, o que poderá apontar para um bom desempenho destes betumes à deformação permanente. A influência da percentagem de óleo de motor usado ou de fundo de coluna nas temperaturas de amolecimento é limitada, com uma variação máxima de 9 °C entre todos os betumes modificados com SBS. Quando comparados os betumes modificados com SBS (5%) e HDPE (6%) verifica-se que esta propriedade poderá ser mais influenciada pelo tipo e percentagem de polímero do que pela percentagem dos substitutos parciais.

Como tal, o betume modificado com fundo de coluna e SBS que apresenta valores de penetração compreendidos entre os limites máximos e mínimos de um betume PMB45/80 e, ao mesmo tempo, maximiza a utilização de resíduos é o betume modificado com 12,5% de fundo de coluna e 5% de SBS.

Os resultados de viscosidade dinâmica (Figura 4.20) dos betumes com fundo de coluna e SBS são superiores aos betumes modificados com óleo de motor usado e SBS, tal como se verificou nos betumes com HDPE. Para além disso, os betumes modificados com SBS apresentam uma viscosidade

ligeiramente inferior aos correspondentes betumes modificados com HDPE, provavelmente devido à menor percentagem de polímero utilizada. Contudo, estes betumes modificados exibem temperaturas de produção (cerca de 180 °C ou superiores) e compactação (cerca de 135 °C) semelhantes.

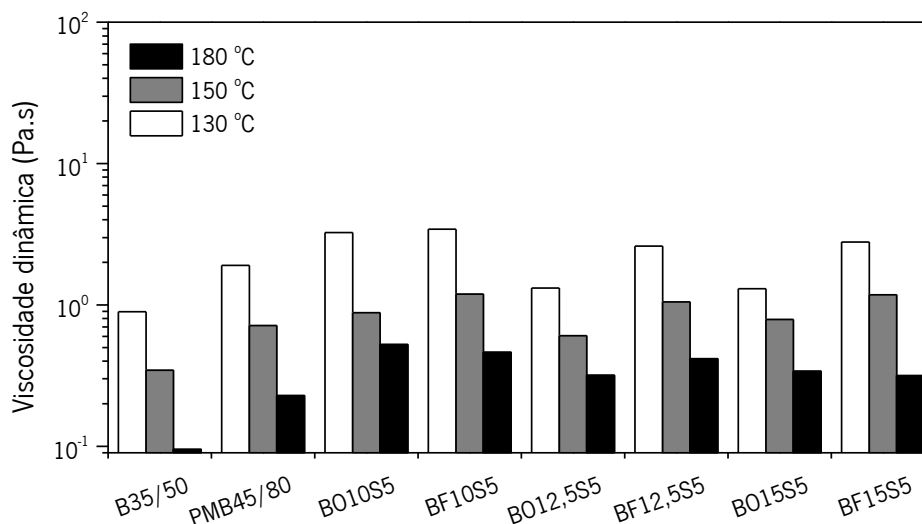


Figura 4.20. Viscosidade dinâmica dos betumes modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 5% de SBS.

Tal como mencionado anteriormente, é comum e viável a utilização de maiores percentagens de CR (neste caso 20%) comparativamente a outros tipos de polímeros, tais como, o HDPE e SBS. Desta forma, os betumes modificados com CR neste estudo deverão apresentar as maiores taxas de reciclagem ao combinarem a elevada percentagem de polímero e de fundo de coluna. Seguindo o protocolo anteriormente mencionado, as propriedades básicas dos betumes modificados com CR são apresentadas na Figura 4.21 e Figura 4.22, com a incorporação de três percentagens de óleo de motor usado ou fundo de coluna (7,5%, 10% e 15%).

Os resultados de penetração e temperatura de amolecimento dos betumes modificados com CR são claramente mais influenciados pelo tipo de substituto parcial usado (O e F) do que os anteriores polímeros, tal como se pode observar na Figura 4.21. Para além disso, foi necessário adicionar uma maior quantidade de fundo de coluna (15%) de modo a obter um valor de penetração compreendido entre os limites requeridos para um betume modificado PMB45/80. Para quantidades de fundo de coluna de 7,5% e 10%, os valores de penetração são mais baixos que o limite inferior da gama de penetrações do betume modificado comercial.

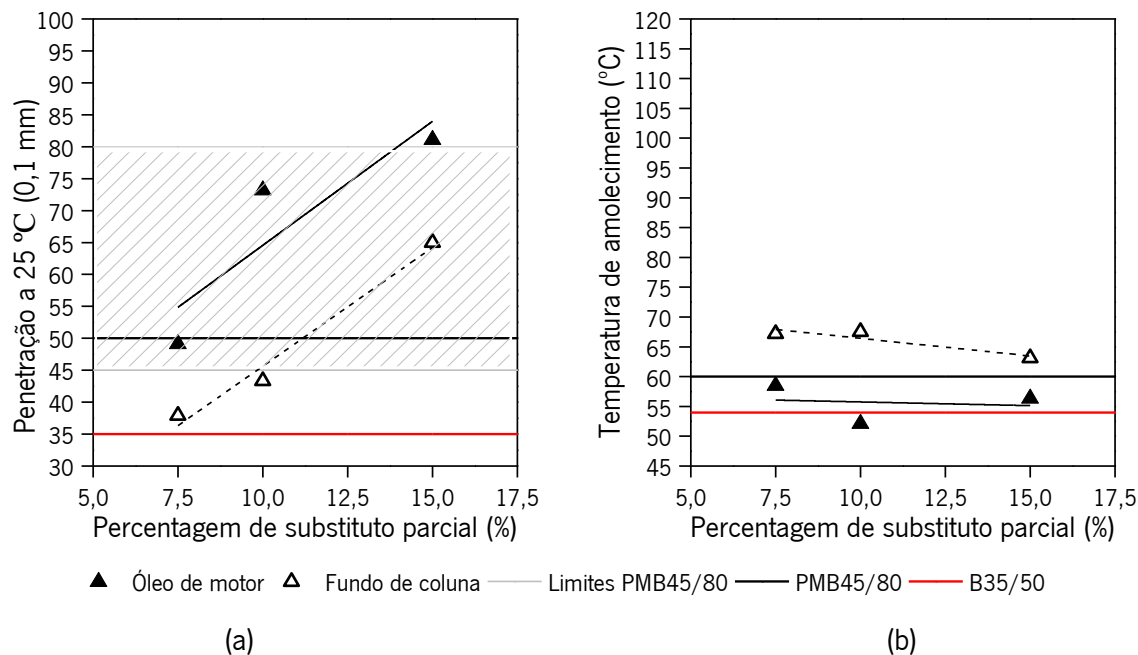


Figura 4.21. Resultados de (a) penetração e (b) temperatura de amolecimento dos betumes modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 20% de CR.

Quanto à temperatura de amolecimento e devido à baixa interação da CR com o betume, estes ligantes não apresentam temperaturas de amolecimento tão elevadas como as obtidas com os polímeros HDPE e SBS. Aliado a isso, as temperaturas de amolecimento tendem a reduzir com o aumento da quantidade de substituto parcial. Contudo, os betumes modificados com fundo de coluna e CR exibem temperaturas de amolecimento superiores às temperaturas de amolecimento dos betumes de controlo.

Consequentemente, o betume modificado que cumpre os dois requisitos para esta fase do estudo, nomeadamente, maximização de resíduos e valor de penetração compreendida entre $45 \times 0,1$ mm e $80 \times 0,1$ mm, foi o betume com 15% de fundo de coluna e 20% de CR (BF15R20).

Os resultados de viscosidade dinâmica (Figura 4.22) dos betumes modificados com fundo de coluna e CR são superiores aos dos betumes modificados com óleo de motor usado e CR. Adicionalmente, os betumes modificados com CR apresentam uma viscosidade mais elevada do que todos os betumes modificados avaliados neste estudo, o que poderá dever-se à elevada quantidade de polímero utilizada (20%). Estes resultados influenciam as temperaturas de produção (superiores a 180 °C) e compactação (cerca de 150 °C ou ligeiramente mais) deste tipo de misturas.

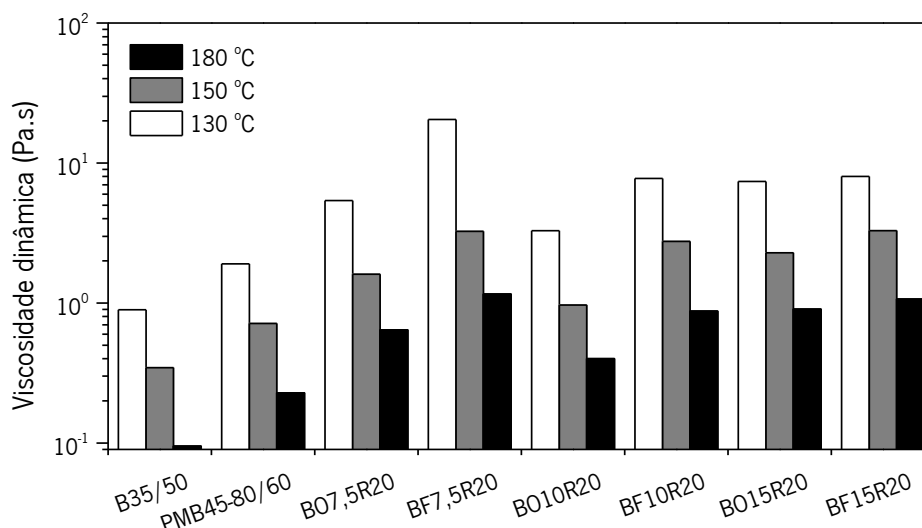


Figura 4.22. Viscosidade dinâmica dos betumes modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 20% de CR.

Em suma, os betumes modificados com fundo de coluna e polímeros que apresentam as propriedades básicas mais promissoras são os seguintes: betume modificado com 15% de fundo de coluna e 6% de HDPE (BF15H6), o betume modificado com 12,5% de fundo de coluna e 5% de SBS (BF12,5S5) e, por último, o betume modificado com 15% de fundo de coluna e 20% de CR (BF15R20). Em seguida, será realizada uma análise das propriedades mais avançadas destes betumes, assim como dos betumes modificados com óleo de motor usado e respetivos polímeros e, proceder-se-á à comparação entre estes betumes e os betumes de controlo.

4.4. Caracterização adicional dos betumes modificados com resíduos previamente selecionados

Após a seleção dos betumes com as propriedades mais promissoras, por outras palavras, os betumes modificados com resíduos que apresentam características básicas similares a um betume modificado comercial e que maximizem a utilização de resíduos, estes deverão ser avaliados quanto às suas propriedades mais avançadas. Deste modo, os betumes modificados com óleo de motor ou fundo de coluna selecionados serão avaliados ao nível das propriedades reológicas, da resistência ao envelhecimento e da estabilidade térmica com o objetivo de estudar a influência das diferentes combinações de polímeros e de substitutos parciais.

4.4.1. Propriedades básicas

No Quadro 4.3 é possível observar a síntese das propriedades básicas dos diferentes betumes em análise, nomeadamente os valores de penetração, temperatura de amolecimento, resiliência e temperaturas de produção/compactação obtidas através do ensaio de viscosidade dinâmica, de forma a facilitar comparações com as restantes propriedades a avaliar.

Quadro 4.3. Resumo das propriedades básicas (penetração, temperatura de amolecimento, resiliência e temperaturas de produção/compactação) dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas.

Betume	Penetração a 25 °C (0,1 mm)	Temperatura de amolecimento (°C)	Resiliência (%)	Temperatura (°C)	
				Produção	Compactação
B35/50	35	54	5	150	130
PMB45/80	50	60	18	180	130
BO10H6	51	83	9	180	135
BO10S5	50	80	29	180	135
BO7,5R20	49	59	33	180	160
BF15H6	52	115	7	180	140
BF12,5S5	66	89	27	180	135
BF15R20	65	63	39	180	160

Constata-se que ao nível da resiliência, apenas mencionada anteriormente nos betumes modificados com óleo de motor e polímeros, os betumes modificados com CR e SBS apresentam os maiores valores de resiliência, devido às propriedades elásticas típicas dos polímeros denominados elastómeros. Estes polímeros são muito utilizados na pavimentação rodoviária devido à melhoria que provocam na resiliência das misturas betuminosas. Para além disso, importa ainda salientar a falta de resiliência dos betumes com HDPE, uma vez que os seus valores são da mesma ordem de grandeza do betume convencional (B35/50). Esta falta de capacidade resiliente está relacionada com o facto de o HDPE ser um plastómero, ou seja, este tipo de polímero tem como principal vantagem o aumento da rigidez do betume e não o aumento da sua resposta elástica.

Em seguida, os betumes modificados com resíduos, bem como os betumes de controlo, serão avaliados através de ensaios de caracterização mais avançados.

4.4.2. Propriedades reológicas

As curvas mestras dos módulos complexos e ângulos de fase dos betumes comerciais e betumes modificados com resíduos em análise podem ser visualizados na Figura 4.23. Como é possível verificar, as curvas mestras dos módulos complexos dos betumes modificados com polímeros e óleo de motor usado ou fundo de coluna apresentam uma forma muito similar ao betume modificado comercial e ao betume convencional, indicando um comportamento reológico análogo aos betumes PMB45/80 e B35/50. Contudo, todos os betumes modificados com polímeros e óleo de motor usado ou fundo de coluna apresentam um módulo complexo superior ao betume PMB45/80, exceto a elevadas frequências (ou baixas temperaturas) onde os betumes BF15R20 e BF12,5S5 exibem valores de módulo mais baixos.

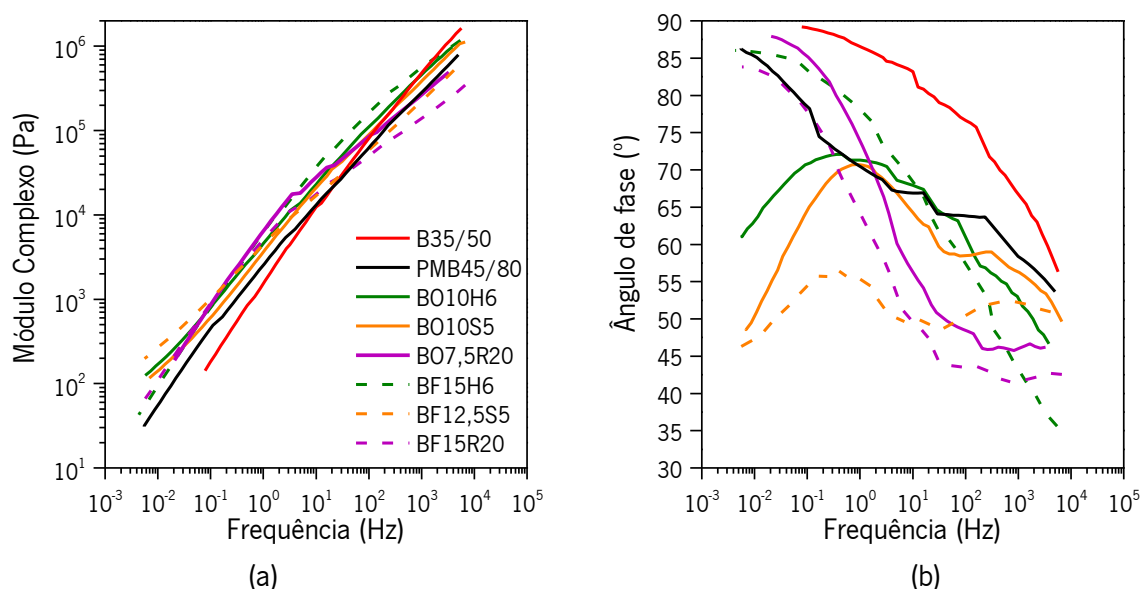


Figura 4.23. Curvas mestras ($T_{ref}=60\text{ °C}$) do (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas.

Os betumes modificados desenvolvidos neste estudo apresentam uma menor suscetibilidade térmica devido aos elevados valores de módulo complexo a elevadas temperaturas (baixas frequências) e módulos complexos similares ou mais baixos a baixas temperaturas (elevadas frequências) do que o betume de controlo B35/50. Este comportamento poderá ser vantajoso na medida em que estes betumes tenderão a apresentar um melhor desempenho, numa maior gama de temperaturas de serviço, sendo mais resistentes à deformação permanente a elevadas temperaturas e mais flexíveis a temperaturas mais baixas.

No que concerne às curvas mestras dos ângulos de fase (Figura 4.23b) dos betumes modificados com resíduos é possível verificar que os betumes modificados com SBS apresentam um comportamento diferente dos restantes betumes com resíduos, uma vez que exibem valores de ângulos de fase praticamente inferiores em toda a gama de temperaturas/frequências, comparativamente ao betume modificado comercial. Isto é consequência das características de elastómero deste polímero que visivelmente reduzem a natureza viscosa do betume. Não obstante, todos os betumes modificados com resíduos exibem ângulos de fase inferiores ao betume de controlo B35/50, e ângulos de fase semelhantes ou inferiores ao betume modificado comercial (PMB45/80). Como tal, é evidente que a combinação do óleo de motor/fundo coluna e polímeros resulta em betumes com um desempenho reológico mais promissor.

A temperatura mais elevada do grau PG dos betumes de controlo e dos betumes modificados com resíduos foi determinada tendo em conta o procedimento anteriormente mencionado e, podem ser observadas no Quadro 4.4. Deste modo é possível verificar que há um aumento da temperatura mais elevada do grau PG para todos os betumes modificados com resíduos comparativamente aos betumes de controlo (B35/50 e PMB45/80).

Quadro 4.4. Temperatura mais elevada do grau PG dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas.

Betumes	Temperatura máxima do grau PG
B35/50	64
PMB 45-80/60	70
BO10H6	76
BO10S5	76
BO7,5R20	76
BF15H6	76
BF12,5S5	82
BF15R20	76

Uma vez que o rácio $|G^*|/\sin\delta$ pode ser relacionado com a resistência à deformação permanente e como o betume modificado com fundo de coluna e SBS (BF12,5S5) apresenta o valor mais elevado da temperatura mais elevada do grau PG, este resultado poderá ser um indicador de uma boa resistência à deformação permanente por parte do mesmo. Os restantes betumes modificados com resíduos podem

também apresentar uma boa resistência à deformação permanente quando comparados com o betume modificado comercial, na medida que as temperaturas mais elevadas do grau PG destes são superiores.

Tal como mencionado anteriormente, o ensaio de fluência e relaxamento também pode ser utilizado para avaliar as propriedades reológicas dos betumes modificados. O gráfico que mostra a variação do parâmetro de deformação não recuperada com o aumento da tensão aplicada dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas pode ser observado na Figura 4.24.

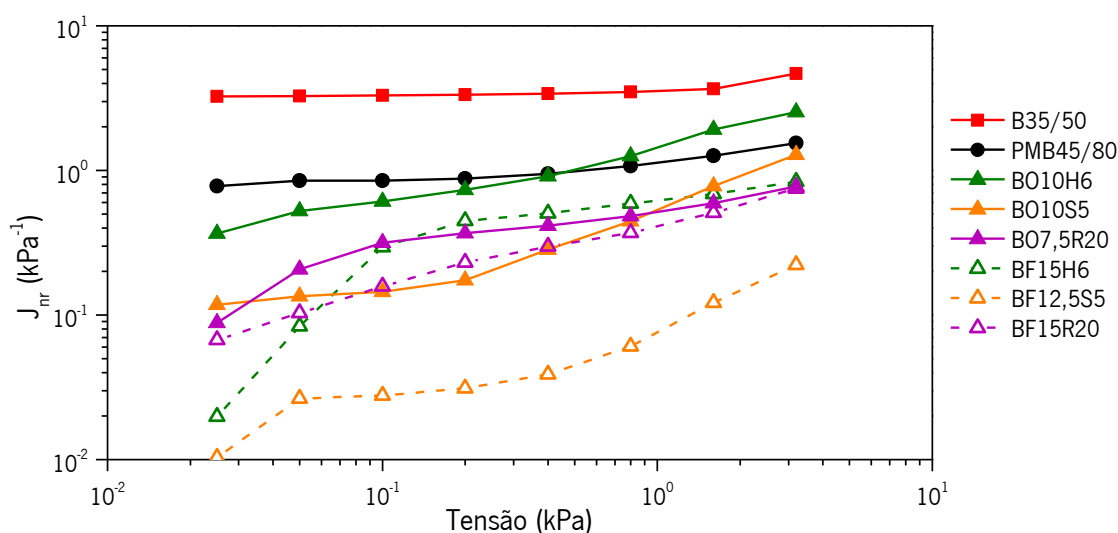


Figura 4.24. Parâmetro de deformação não recuperada (J_{nr}) dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas.

De acordo com a Figura 4.24, o betume modificado com 12,5% de fundo de coluna e 5% de SBS (BF12,5S5) deverá apresentar o melhor desempenho à deformação permanente devido ao baixo valor do parâmetro de deformação não recuperada, sendo este significativamente mais baixo do que o dos betumes de controlo (PMB45-80 e B35/50). Apesar disso, todos os betumes modificados com resíduos exibem valores do parâmetro de deformação não recuperada (J_{nr}) inferiores aos dos betumes de controlo. A única exceção é o betume modificado com 10% de óleo de motor e 6% de HDPE que apresenta um maior valor do parâmetro de deformação não recuperada, para tensões superiores a 0,4 kPa, do que o betume modificado comercial (PMB45/80).

Tendo em conta os resultados mencionados anteriormente, deve ressaltar-se que os betumes modificados com fundo de coluna e polímeros poderão apresentar melhor resistência à deformação permanente do que os betumes modificados com óleo de motor e polímeros, visto que os valores de J_{nr}

dos primeiros são inferiores aos correspondentes betumes modificados com óleo de motor e polímeros. Estes resultados vão de encontro aos elevados valores de temperatura de amolecimento obtidos para os betumes modificados com fundo de coluna e polímeros.

4.4.3. Resistência ao envelhecimento

O envelhecimento do betume é uma das principais causas da deterioração dos pavimentos e ocorre durante o processo de produção e compactação, bem como durante a vida útil do pavimento. Neste estudo, a resistência ao envelhecimento foi avaliada através do ensaio RTFOT (*Rolling Thin-Film Oven Test*) e do ensaio FTIR (espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier). Esta avaliação foi realizada para verificar se estes novos betumes modificados com resíduos aumentam ou diminuem a resistência ao envelhecimento comparativamente aos betumes convencionais, em especial porque os óleos podem originar uma maior perda de componentes voláteis (associados ao envelhecimento).

O ensaio RTFOT (EN 12607) inicia-se com a pesagem de dois recipientes de vidro normalizados (devidamente identificados A e B), onde posteriormente se colocam 35 g do betume em análise. Para além dos dois recipientes que serão usados para avaliar a variação de massa, mais amostras de 35 g do betume em análise devem ser colocadas noutros recipientes de vidro (número de recipientes necessário para recolher amostras para caracterização do mesmo). Após arrefecerem e atingirem a temperatura ambiente (pelo menos 1 hora dentro de um exsicador), os recipientes A e B com as amostras são pesados.

Em seguida, todos os recipientes são colocados nos compartimentos contidos na estufa (que se encontra à temperatura de ensaio, 163 °C), ficando sujeitos a uma rotação de 15 rotações/min e a um fluxo de ar de 4 L/min. As amostras são mantidas na estufa nestas condições durante 75 min, após atingir a temperatura de ensaio (que sofre uma redução quando se colocam as amostras no seu interior). Caso a temperatura de ensaio não seja atingida durante 15 min, as amostras devem ser descartadas.

Após os 75 min de ensaio, as amostras são retiradas da estufa e, no caso das amostras A e B, estas são arrefecidas até atingirem a temperatura ambiente num exsicador (durante pelo menos 1 hora), e posteriormente pesadas. As restantes amostras devem ser todas vertidas no mesmo recipiente, sem arrefecerem, de modo a garantir a homogeneização e, de seguida colhidas amostras para posterior

caracterização. Do ensaio RTFOT é possível obter a perda de massa das amostras (após envelhecimento), bem como a penetração conservada e o aumento da temperatura de amolecimento (Figura 4.25).

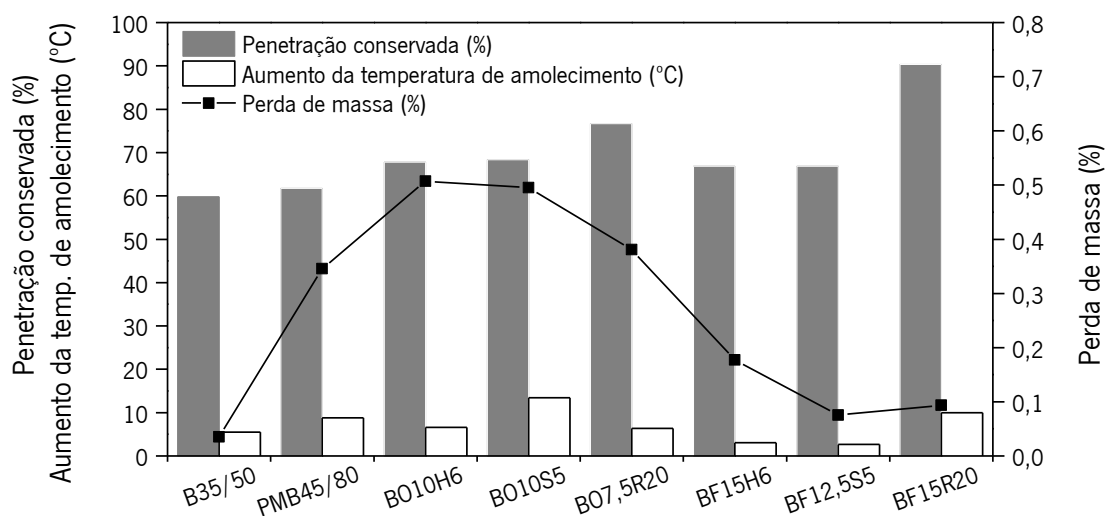


Figura 4.25. Resultados de envelhecimento (penetração conservada, aumento da temperatura de amolecimento e perda de massa) dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas.

De acordo com a norma EN 12591, o betume B35/50 deve apresentar uma penetração conservada igual ou superior a 53%, um aumento da temperatura de amolecimento igual ou inferior a 8 °C e uma variação de massa igual ou inferior a 0,5%. Por sua vez, um betume modificado de classe 4 (PMB45/80) deverá exibir uma penetração conservada igual ou superior a 45%, um aumento da temperatura de amolecimento igual ou inferior a 12 °C e uma variação de massa igual ou inferior a 0,8% (norma EN 14023). Assim, verifica-se que os betumes de controlo cumprem as características exigidas quanto à resistência ao envelhecimento impostas pelas respetivas normas anteriormente referidas.

Por sua vez, os betumes modificados com resíduos cumprem os requisitos estipulados para betumes modificados de classe 4, com exceção do betume B010S5 que apresenta uma temperatura de amolecimento (13 °C) ligeiramente superior ao limite requerido (12 °C). Apesar da introdução de resíduos (óleo e fundo de coluna) que contêm compostos relacionados com envelhecimento (sulfóxido e carbonilo), a resistência ao envelhecimento dos betumes modificados com resíduos encontra-se garantida para estes betumes modificados.

Quando comparados entre si, verifica-se que os betumes modificados com óleo apresentam maiores perdas de massa do que os betumes modificados com fundo de coluna, apesar de os últimos

incorporarem maiores quantidades de substituto parcial. Para além disso, o betume modificado com 10% de óleo de motor e 6% de HDPE (BO10H6) exibe a maior perda de massa (0,5%), enquanto o betume com 12,5% de fundo de coluna e 5% de SBS apresenta a menor (0,1%).

Relativamente à penetração conservada, os betumes modificados com borracha apresentam os valores de penetração conservada mais elevados (77% e 90%), indicando que este tipo de polímero poderá contribuir para que o betume mantenha a sua rigidez, após envelhecimento. O aumento da temperatura de amolecimento é mais notório nos betumes modificados com óleo de motor usado do que nos betumes modificados com fundo de coluna. Importa salientar que no caso do betume com borracha essa diferença inverte-se. Contudo tal facto poderá estar relacionado com a diferença de 7,5% na quantidade de substituto parcial que os dois betumes exibem (BO7,5R20 e BF15R20).

O processo de envelhecimento dos betumes pode ainda ser avaliado através do ensaio de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). De acordo com Yao *et al.* (2013) e Wu *et al.* (2009) a estrutura química e morfológica do betume pode sofrer alterações resultantes do envelhecimento do mesmo durante o processo de produção das misturas e durante a sua vida útil. As principais reações químicas que ocorrem durante o processo de envelhecimento estão relacionadas com a formação de compostos oxidativos, nomeadamente nos números de onda 1700 cm^{-1} e 1030 cm^{-1} correspondentes à presença de carbonilo e sulfóxido, respetivamente. A intensidade destes compostos tende a aumentar como consequência do processo de envelhecimento (Ouyang *et al.*, 2006, Zhang *et al.*, 2011).

O aumento da intensidade da banda da ligação dupla C=O com o envelhecimento pode relacionar-se com o aumento da quantidade de compostos polares, ou seja, moléculas de maior dimensão (asfaltenos). Por sua vez, o grupo funcional sulfóxido é formado por oxidação dos grupos de sulfureto e está presente no betume antes do envelhecimento, o que poderá indicar que é formado durante a fase de obtenção do mesmo (Ouyang *et al.*, 2006).

De forma a avaliar estas alterações é necessário calcular os índices estruturais (Wu *et al.*, 2009, Yao *et al.*, 2013, Zhang *et al.*, 2011), nomeadamente o índice de carbonilo (Equação 4.1) e o índice de sulfóxido (Equação 4.2):

$$I_{\text{C=O}} = \frac{\text{Área da banda carbonilo centrada a cerca de } 1700\text{ cm}^{-1}}{\sum \text{Área das bandas espectrais compreendidas entre } 2000\text{ cm}^{-1} \text{ e } 600\text{ cm}^{-1}} \quad (4.1)$$

$$I_{S=O} = \frac{\text{Área da banda carbonilo centrada a cerca de } 1030 \text{ cm}^{-1}}{\sum \text{Área das bandas espectrais compreendidas entre } 2000 \text{ cm}^{-1} \text{ e } 600 \text{ cm}^{-1}} \quad (4.2)$$

A área da banda de carbonilo e sulfóxido refere-se ao integral do gráfico do espectro FTIR compreendido entre os vales, isto é, entre os pontos de inflexão imediatamente antes e após o pico em estudo. O integral do gráfico do espectro FTIR compreendido entre 2000 cm^{-1} e 600 cm^{-1} permite obter o denominador usado para o cálculo dos índices estruturais. O cálculo das áreas anteriormente mencionadas foi obtido através do *software Origin*.

Como foi não foi possível dissolver os betumes modificados com borracha no clorofórmio (a solução apresentava grânulos de borracha após a adição do solvente e agitação), a hipótese de avaliar, através do FTIR utilizado na análise dos substitutos parciais do betume e dos betumes de controlo (B35/50 e PMB45/80), as alterações químicas dos betumes com CR antes e após envelhecimento, dos restantes betumes modificados com resíduos e dos betumes de controlo, tornou-se inviável.

Como tal, foi necessário utilizar uma análise FTIR em reflexão total atenuada (ATR) pois permite colocar uma pequena quantidade do betume modificado ou convencional em contacto com o cristal do equipamento analisando-se a amostra numa gama de número de onda entre 4000 cm^{-1} e os 400 cm^{-1} , com 45 varrimentos, não sendo necessário o uso de solvente. Desta forma garante-se que é analisado o efeito da borracha na análise antes e após envelhecimento.

A Figura 4.26 apresenta os índices de carbonilo dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas antes e após o ensaio RTFOT. Tal como seria de esperar, o betume de controlo B35/50 sofre um aumento do índice de carbonilo após o processo de envelhecimento do RTFOT (de 0,150 para 0,168). Contudo, o mesmo não se verifica no betume modificado comercial PMB45/80 (reduz de 0,191 para 0,169). A utilização de betume modificado comercial pode atrasar o processo de oxidação do betume, isto é, retardar o seu envelhecimento, contribuindo para uma maior vida à fadiga quando usado nas misturas betuminosas.

Relativamente aos betumes modificados com resíduos, o seu comportamento está dependente do tipo de substituto parcial utilizado. Por outras palavras, os betumes modificados com polímeros e óleo de motor apresentam um comportamento semelhante ao betume de controlo B35/50, exibindo um aumento do índice de carbonilo (maior envelhecimento) após o processo de RTFOT. Por sua vez, os

betumes modificados com polímeros e fundo de coluna exibem o comportamento oposto (semelhante ao betume modificado de controlo), reduzindo o índice de carbonilo após o processo de envelhecimento e contribuindo para o atraso do processo de oxidação.

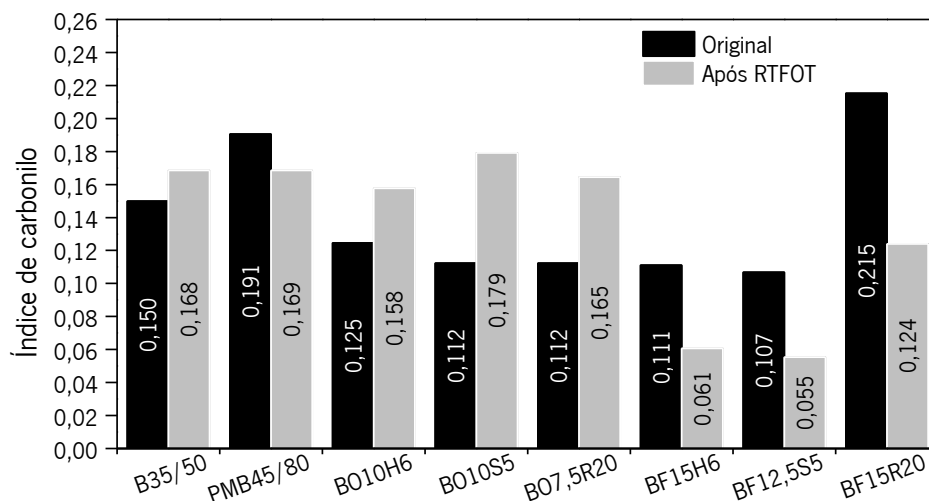


Figura 4.26. Índice de carbonilo dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas antes e após RTFOT.

Para além disso pode ainda constatar-se que os betumes modificados com polímeros e fundo de coluna apresentam após o ensaio de RTFOT os menores índices de carbonilo, o que vem de encontro às menores perdas de massa que os mesmos exibem nos resultados de resistência ao envelhecimento (ensaio de RTFOT) anteriormente analisados.

Como se pode observar na Figura 4.27, os índices de sulfóxido sofrem uma redução ou mantêm-se após o processo de envelhecimento em todos os betumes em análise. O mesmo tipo de comportamento foi verificado no estudo de Yao *et al.* (2013). Tendo em conta os resultados obtidos, esses autores referem que não se deve considerar este índice para avaliar o envelhecimento nos betumes.

Deste modo, pode constatar-se que a introdução de fundo de coluna e polímeros contribui para o aumento da resistência ao envelhecimento, ou seja, para retardar os processos de oxidação do betume. Para além disso, os betumes modificados com óleo de motor usado e polímeros também apresentam perdas de massa dentro dos limites exigidos e índices de carbonilo similares ou ligeiramente superiores aos betumes de controlo B35/50 e PMB45/80.

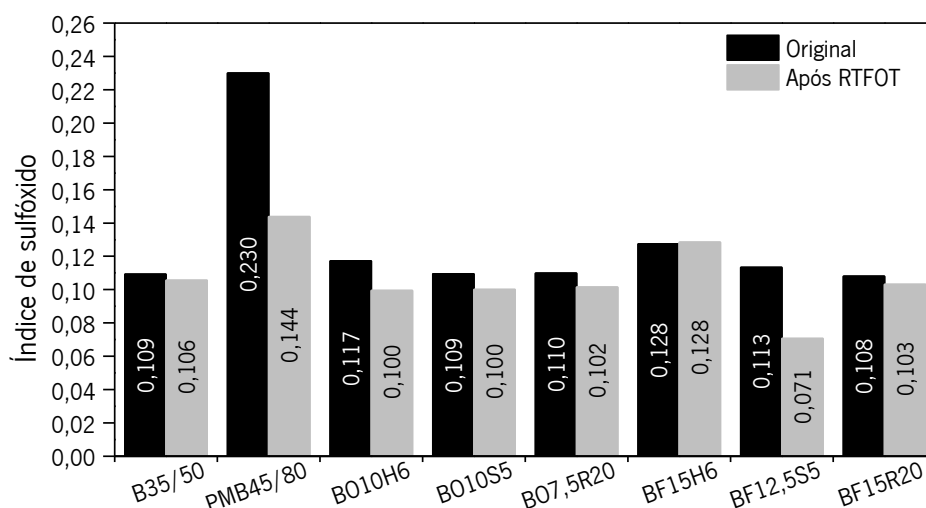


Figura 4.27. Índice de sulfóxido dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas antes e após RTFOT.

4.4.4. Propriedades térmicas

As propriedades térmicas dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas podem ser consultadas no Quadro 4.5. Tal como mencionado anteriormente, o betume de controlo B35/50 é mais estável termicamente, isto é, o início da perda de massa ocorre a uma temperatura superior à do betume modificado comercial (PMB45/80). A verdade é que mesmo na resistência ao envelhecimento verifica-se que o betume modificado comercial apresenta maior perda de massa do que o betume convencional, o que vem reforçar o facto do betume PMB45/80 possuir uma maior componente volátil.

Quadro 4.5. Resultados do ensaio de termogravimetria dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas.

Betumes	T _{onset} (°C)	T _{max} (°C)
B35/50	262	453
PMB 45/80	229	443
B010H6	214	447
B010S5	225	450
B07,5R20	197	439
BF15H6	223	448
BF12,5S5	218	443
BF15R20	202	438

Nos betumes modificados com resíduos pode constatar-se uma menor estabilidade térmica comparativamente aos betumes de controlo. Importa salientar que no caso dos betumes com borracha, o início de perda de massa ocorre a temperaturas mais baixas do que os restantes betumes com resíduos (197 e 202 °C). Apesar destas temperaturas serem mais baixas que as restantes, a produção destes betumes modificados não fica comprometida, uma vez que a temperatura de produção dos betumes é inferior em cerca de 17 °C. Pode ainda verificar-se que as temperaturas onde ocorrem as perdas máximas de massa são similares entre betumes modificados com o mesmo tipo de polímero.

A introdução de substitutos parciais no betume, nomeadamente o óleo de motor usado e fundo de coluna, diminuem a estabilidade térmica comparativamente aos betumes de controlo. Todavia, alguns dos betumes modificados com resíduos, nomeadamente os betumes BO10S5 e BF15H6, apresentam temperaturas de início de perda de massa muito próximas do betume modificado comercial. Como tal, a sua estabilidade térmica poderá ser comparável à de um betume modificado comercial de classe 4 (PMB45/80).

5. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS COM BETUMES MODIFICADOS COM RESÍDUOS

5.1. Condições de produção e formulação das misturas betuminosas em estudo

As misturas betuminosas de controlo e as misturas betuminosas com betumes modificados com resíduos foram produzidas tendo em conta as seguintes etapas: i) introdução dos agregados graníticos e filler calcário, previamente aquecidos à temperatura de produção da respetiva mistura, na misturadora durante o tempo necessário para a sua homogeneização (inferior a 1 min); e, ii) adição do betume em análise à respetiva temperatura de produção (obtida pelo ensaio de viscosidade dinâmica), misturando-o com os agregados durante 2 minutos, de acordo com a norma EN 12697-35.

Importa salientar que à mistura de controlo com betume convencional B35/50 serão adicionadas fibras acrílicas que deverão ser introduzidas na primeira etapa do processo de produção das misturas (juntamente com os agregados graníticos e filler calcário), à temperatura ambiente. As temperaturas de produção e compactação das misturas preparadas com os betumes em análise poderão ser consultadas no Quadro 4.3.

De modo a determinar a percentagem ótima de betume a utilizar na produção das misturas betuminosas com betumes modificados com resíduos realizou-se o estudo de formulação pelo método *Marshall*, com base no ensaio referido na norma EN12697-34 e de acordo com as indicações do Anexo Nacional da norma EN 13108-1 para a mistura de controlo com betume modificado comercial. Salienta-se que a norma anterior aplica-se a misturas do tipo betão betuminoso, mas não havendo ainda uma metodologia de formulação específica para misturas SMA em Portugal, optou-se pela sua utilização.

A percentagem ótima obtida para esta mistura serviu de referência para as restantes misturas, convencional e com betumes modificados com resíduos, para garantir uma percentagem de betume igual para todas, sendo assim possível avaliar o efeito dos betumes modificados com resíduos no desempenho das misturas, quando aplicados nas mesmas quantidades de um betume modificado comercial. Deste modo procurou-se garantir o melhor desempenho possível da mistura de controlo (mistura com PMB45/80) e avaliou-se o real desempenho dos betumes modificados com resíduos por comparação com essa mistura de controlo.

A curva granulométrica selecionada para as misturas betuminosas com os betumes de controlo e com os betumes modificados com resíduos, bem como os limites estipulados pela norma EN 13108-5 para este tipo de misturas, pode ser observado na Figura 5.1. A curva granulométrica foi obtida através da combinação de 74,5% da fração 6/14 com 20% da fração 0/4, juntamente com 5,5% de filler. A norma EN 13108-5 refere apenas limites obrigatórios para quatro dimensões de peneiros, nomeadamente as dimensões de 20 mm, 14 mm, 2 mm e 0,063 mm (SMA 14), os quais foram cumpridos pela curva granulométrica adotada.

Para além de cumprir os limites especificados na norma, optou-se por aproximar o mais possível a curva granulométrica a usar das curvas granulométricas referidas na literatura (Capítulo 2) para este tipo de mistura. Tendo por base a curva granulométrica apresentada na Figura 5.1, iniciou-se o estudo *Marshall* para a mistura de controlo com betume modificado comercial (PMB45/80).

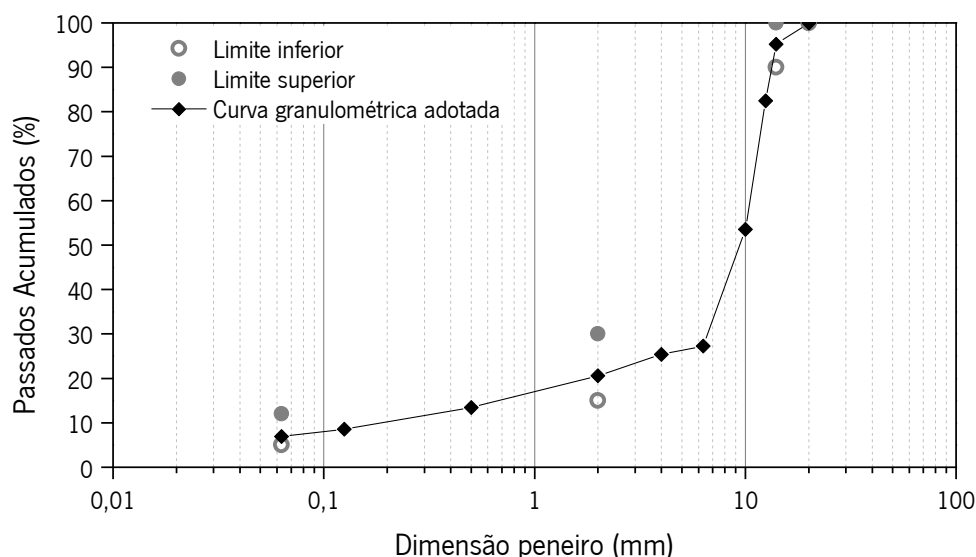


Figura 5.1. Limites especificados de uma mistura SMA 14 e curva granulométrica das misturas de controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.

O estudo *Marshall* inicia-se com a produção de cinco grupos de três provetes, onde a percentagem de betume sofre incrementos de 0,5% entre cada um dos grupos. Como se trata de uma mistura SMA, as percentagens de betumes selecionadas foram 5,3%, 5,8%, 6,3%, 6,8% e 7,3%, uma vez que este tipo de mistura necessita de uma maior percentagem de betume do que as misturas convencionais (i.e. AC 14 surf).

A mistura foi produzida tendo em conta o procedimento anteriormente descrito, sendo que a temperatura de produção e compactação utilizada foi de 180 °C e 135 °C, respetivamente. A compactação dos provetes cilíndricos foi realizada num compactador de impacto normalizado. Importa salientar que o mesmo procedimento de compactação foi usado para os provetes de sensibilidade à água.

No caso das lajes que permitiram a obtenção dos provetes para o ensaio de deformação permanente e resistência ao fendilhamento por fadiga, a sua compactação foi efetuada utilizando um cilindro de rastos lisos.

Após a produção dos provetes procedeu-se à determinação das características volumétricas, nomeadamente da baridade aparente (norma EN 12697-6, método B) e da baridade máxima teórica (norma EN 12697-5, procedimento A), assim como, das dimensões e massa de cada provete. Estas características permitem ainda determinar o volume de vazios e o volume de vazios no agregado compactado (VMA). Em seguida foi realizado o ensaio de compressão *Marshall* a cada um dos provetes, à temperatura de 60 °C, com uma velocidade de 50,8 mm/min, onde foi possível determinar a força de rutura e a deformação correspondente.

Como se trata de uma mistura com maiores percentagens de betume, o que pode levar ao fenómeno de escorrência e, como não foram adicionados estabilizadores (i.e. fibras), optou-se por realizar o ensaio de escorrimento, pelo método do cesto, de acordo com a norma EN 12697-18 (Figura 5.2). Os resultados deste ensaio também foram considerados no processo de formulação deste tipo de mistura, pois podem condicionar o seu comportamento durante a fase de transporte e aplicação, com consequências no desempenho em serviço. Este ensaio será descrito com maior detalhe na secção 5.2, mas o valor de escorrimento máximo recomendado por Blazejowski (2011) é de 0,2%.



Figura 5.2. Cesto usado no ensaio de escorrimento e exemplo da escorrência de betume observada para a percentagem de betume de 7,2%.

Após determinação de todas as características descritas anteriormente procedeu-se à representação gráfica da relação entre as diferentes percentagens de betume e a média dos valores obtidos para os três provetes de cada grupo, obtendo-se os diferentes gráficos que se podem observar na Figura 5.3.

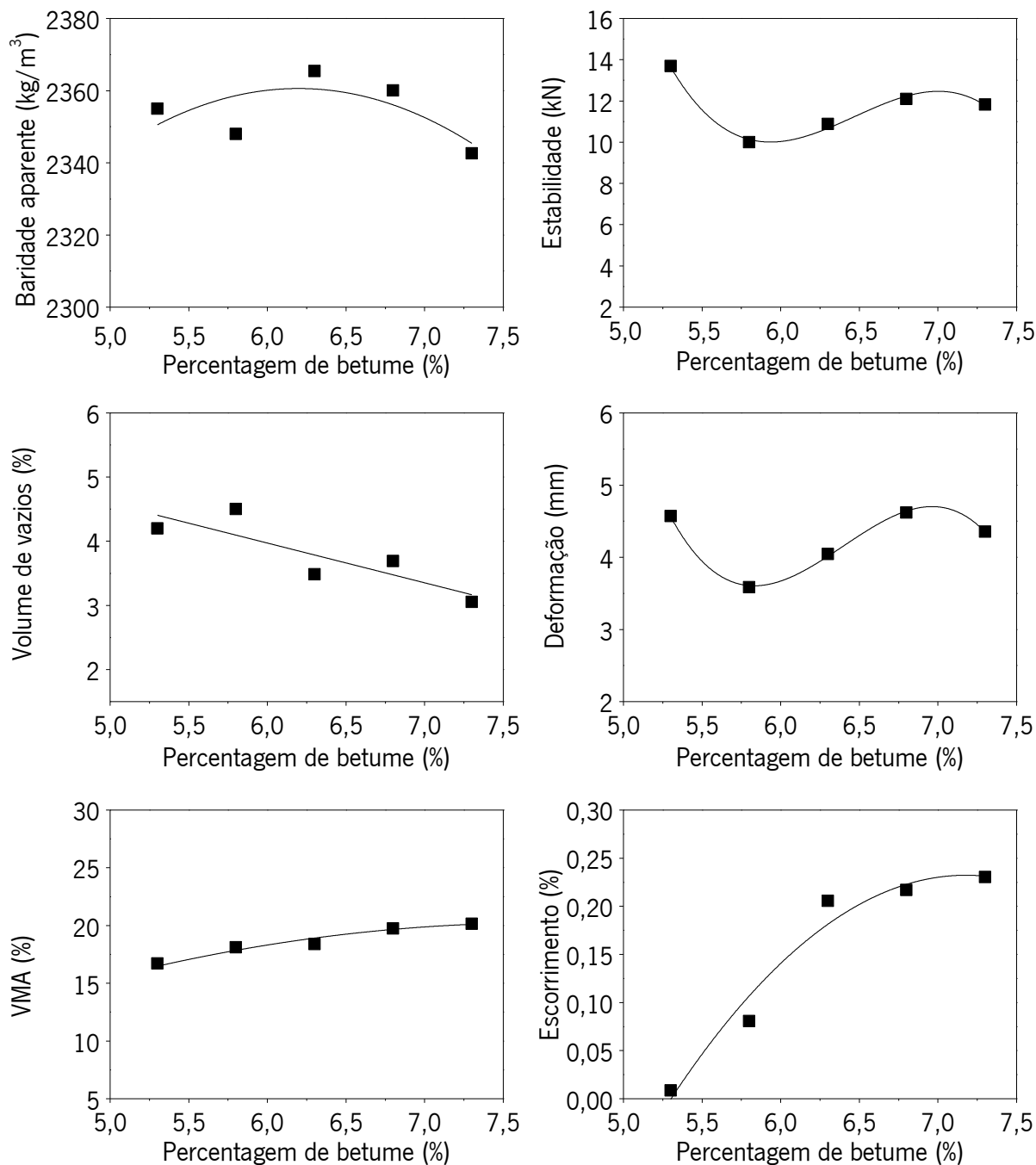


Figura 5.3. Resultados do estudo *Marshall* da mistura SMA-PMB45/80.

A percentagem ótima de betume da mistura é dada pela média das percentagens de betume correspondentes à baridade aparente e estabilidade máximas e do volume de vazios de 4%, referido na

literatura para a formulação deste tipo de misturas. Deste modo, a percentagem ótima de betume obtida foi de 5,8%, a que corresponde: i) baridade aparente de 2348 kg/m³; ii) estabilidade de 10 kN; iii) deformação de 3,6 mm; iv) volume de vazios de 4,5%; v) volume de vazios no agregado compactado de 18,1%; e, vi) escorrimento de 0,08 %. Os valores obtidos de percentagem de betume, volume de vazios, volume de vazios no agregado compactado e escorrimento vão de encontro aos valores exigidos referidos na literatura (Capítulo 2), validando assim as condições de produção escolhidas.

Deste modo, a percentagem ótima obtida no estudo *Marshall* deverá ser utilizada na produção das restantes misturas, sendo elas:

- SMA-B35/50+F (com betume convencional 35/50 + 0,3% de fibras);
- SMA-PMB45/80 (com betume modificado comercial PMB45/80-60);
- SMA-B010H6 (com betume modificado com 10% de óleo de motor e 6% de HDPE);
- SMA-B010S5 (com betume modificado com 10% de óleo de motor e 5% de SBS);
- SMA-B07,5R20 (com betume modificado com 7,5% de óleo de motor e 20% de CR);
- SMA-BF15H6 (com betume modificado com 15% de fundo de coluna e 6% de HDPE);
- SMA-BF12,5S5 (com betume modificado com 12,5% de fundo de coluna e 5% de SBS); e,
- SMA-BF15R20 (com betume modificado com 15% de óleo de motor e 20% de CR).

Em seguida proceder-se-á à caracterização e análise de resultados das misturas betuminosas de controlo e das misturas com óleo de motor usado ou fundo de coluna e polímeros.

Tendo por base o método de produção anteriormente mencionado, foram produzidas oito misturas SMA 14 com os betumes selecionados (um betume convencional, um betume modificado comercial, um betume modificado para cada tipo de polímero com óleo de motor e um betume modificado para cada tipo de polímero com fundo de coluna), com uma percentagem de betume de 5,8%, obtido através do método de formulação *Marshall* (EN 13108-5 e EN 12697-34). As temperaturas de produção e compactação das diferentes misturas foram determinadas de acordo com os resultados do ensaio de viscosidade dinâmica dos diferentes betumes em estudo, tal como mencionado anteriormente e podem ser observadas no Quadro 4.3.

Importa salientar que à mistura SMA 14 com betume convencional foi adicionado 0,3% de fibras com o objetivo de reduzir o escorrimento durante o transporte e compactação da mistura. A percentagem de fibras utilizada foi indicada pelo fornecedor e, para além disso, é uma das percentagens mais utilizada

para este tipo de misturas de acordo com Gardete *et al.* (2011). As fibras apenas foram usadas na mistura de controlo com betume convencional (e não nas restantes misturas) para desta forma avaliar o real desempenho do betume modificado comercial e dos betumes modificados com resíduos neste tipo de misturas (tendo em conta que os betumes modificados com polímeros não deverão ter problemas de escorrimento tão gravesos).

5.2. Escorrimento do ligante

As misturas SMA são conhecidas por necessitarem de uma maior percentagem de betume do que as misturas betuminosas convencionais, o que pode levar à ocorrência de escorrimento do ligante. O escorrimento caracteriza-se pela separação do betume ou mástique dos agregados da mistura a elevadas temperaturas, quando o betume apresenta uma baixa viscosidade. Tal como foi mencionado anteriormente, este problema é normalmente resolvido através da introdução de estabilizadores ou inibidores de escorrimento (i.e. fibras), cuja função é estabilizar o betume que envolve os agregados, pelo aumento da espessura do filme de betume sem que ocorra escorrimento.

O ensaio de escorrimento, pelo método do cesto (de acordo com a norma EN 12697-18), consiste em quantificar o material perdido por escorrimento, após 3 horas, à temperatura de ensaio, de uma amostra contida num cesto de metal perfurado. A temperatura de ensaio depende do betume a utilizar, correspondendo à temperatura de produção acrescida de 25 °C no caso de um betume convencional. Caso se trate de um betume modificado, à temperatura de produção especificada deverão ser adicionados 15 °C. Quanto ao critério de avaliação dos valores de escorrimento, Blazejowski (2011) refere que valores inferiores a 0,2% são os recomendados, valores compreendidos entre 0,2 e 0,3% são aceitáveis e para valores superiores a 0,3% há risco de escorrimento.

Uma vez que às misturas SMA em estudo não foram adicionados inibidores de escorrimento (com a exceção da mistura convencional à qual se adicionou 0,3% de fibras), estas foram avaliadas quanto ao seu comportamento ao escorrimento.

De acordo com a Figura 5.4, é possível verificar-se que as misturas SMA com betumes modificados com resíduos, bem como a mistura de controlo com betume modificado comercial apresentam valores de escorrimento maiores do que a mistura de controlo com betume convencional com fibras. Apesar disso, os valores do ensaio de escorrimento de todas as misturas SMA em estudo são inferiores ao valor

recomendado na literatura ($< 0,2\%$). Importa ainda salientar que as misturas com fundo de coluna e polímeros, apesar de utilizarem maiores quantidades de substituto parcial de betume do que as misturas com óleo e polímeros, apresentam valores de escorrimento claramente inferiores ao valor recomendado.

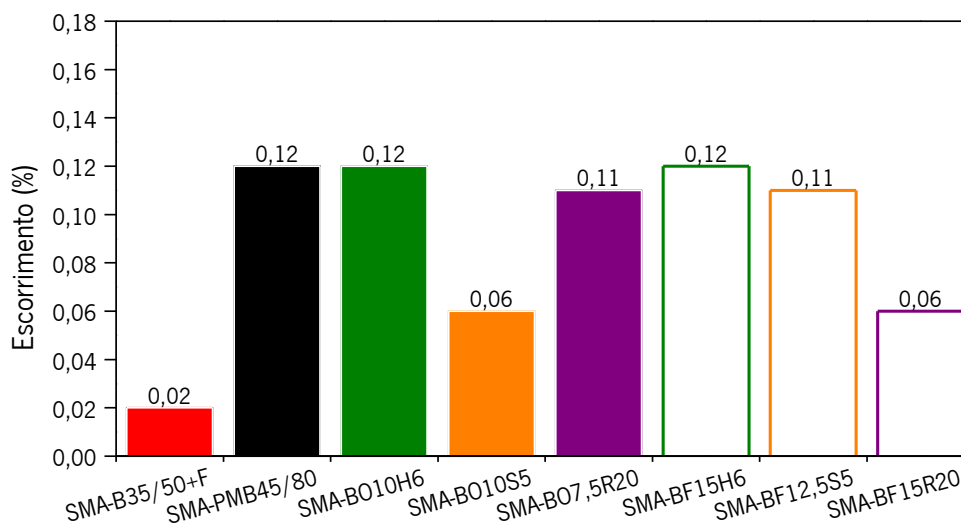


Figura 5.4. Resultados de escorrimento das misturas de controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.

Para além disso, de entre as misturas com fundo de coluna, a mistura com CR (SMA-BF15R20) é aquela que apresenta o menor valor de escorrimento, enquanto nas misturas com óleo de motor, a mistura com melhor desempenho é a mistura com SBS (SMA-BO10S5). Pode assim confirmar-se que os inibidores de escorrimento não são necessários nas misturas SMA estudadas (com 5,8% de ligante modificado com resíduos) para evitar a separação entre o betume/mástique e os agregados da mistura.

Quando se compara os resultados das diferentes misturas produzidas com betumes modificados com resíduos pode verificar-se que o valor de escorrimento das misturas com os betumes modificados com HDPE e óleo (SMA-BO10H6) ou fundo de coluna (SMA-BF15H6) são semelhantes, apesar da maior quantidade de fundo de coluna (15%) comparativamente à de óleo de motor (10%). O facto de ambos exibirem viscosidades semelhantes apesar das diferenças nas quantidades de substituto parcial poderá justificar o comportamento semelhante ao escorrimento.

Por sua vez, o valor de escorrimento da mistura com SBS e óleo de motor é bastante inferior ao valor de escorrimento da mistura com SBS e fundo de coluna, tendo em conta que apenas diferem em 2,5% na

quantidade de substituto parcial. Este facto poderá dever-se à menor viscosidade que o ligante BF12,5S5 apresenta quando comparado com ligante BO10S5.

No caso da mistura com fundo de coluna e borracha (SMA-BF15R20) o comportamento é precisamente o oposto do verificado nas misturas com SBS. Isto é, a mistura com borracha e fundo de coluna apresenta um valor de escorrimento muito inferior comparativamente à mistura com borracha e óleo de motor. Apesar da diferença de substituto parcial ser ainda mais notória nestes betumes (de 7,5% para 15%), o valor de viscosidade do betume BF15R20 é muito superior à do betume BO7,5R20, o que justifica a diferença de resultados e poderá também indicar uma maior interação da borracha com fundo de coluna.

5.3. Características mecânicas das misturas com betumes modificados com resíduos

Depois de concluída a avaliação do escorrimento do ligante das diversas misturas em estudo, as mesmas foram avaliadas quanto ao seu desempenho mecânico sob diferentes condições de serviço, através dos seguintes ensaios: i) sensibilidade à água (de acordo com EN 12697-12); ii) módulo de rigidez (de acordo com EN 12697-26); iii) resistência ao fendilhamento por fadiga (de acordo com AASTHO TP 8-94); e, iv) resistência à deformação permanente (de acordo com EN 12697-22).

5.3.1. Sensibilidade à água

De forma a avaliar a resistência à ação da água das misturas produzidas com os betumes modificados em estudo optou-se por realizar o ensaio de sensibilidade à água. A ação da água sobre as misturas pode desencadear mecanismos de degradação, tais como, a perda de adesividade betume/agregado e/ou perda de coesão do betume, o que pode diminuir a durabilidade das misturas.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 12697-12 e consiste em dividir pelo menos seis provetes cilíndricos em dois grupos com características volumétricas semelhantes, isto é, alturas e baridades com a menor variação possível. Estes dois conjuntos ficam posteriormente sujeitos a condições diferentes: i) à temperatura ambiente; e, ii) condicionados em água a 40 °C, durante um período de tempo compreendido entre 68 e 72 horas. Antes da imersão em água, os provetes devem ser sujeitos a vácuo durante 30 minutos para que todos os vazios sejam preenchidos com água. Após o período de 68 a 72 horas, todos os provetes em estudo deverão ser colocados a uma temperatura de 15 °C (em ar ou em água, em função do respetivo grupo de provetes), durante um período mínimo de 2 horas.

Posteriormente, todos os provetes são submetidos ao ensaio de tração indireta para obter a correspondente resistência dos provetes secos e imersos.

O rácio da resistência à tração indireta (ITSR), ou seja, o rácio entre a resistência à tração indireta (ITS) dos provetes secos e dos provetes imersos permite obter a resistência conservada das misturas betuminosas quando sujeitas à ação da água. O valor mínimo de ITSR que algumas instituições exigem é de 80% (Asphalt Institute, 2001, Brown *et al.*, 2009, Roberts *et al.*, 1996). No caderno de Encargos da Infraestruturas de Portugal não há um valor mínimo para esta propriedade, apesar de começar a haver um consenso de que misturas com valores iguais ou superiores a 80% apresentam um comportamento adequado. De acordo com Sarang *et al.* (2015a) as misturas SMA devem apresentar um valor mínimo de ITSR de 80%, confirmando o valor mais conservativo e o valor mais aceite em Portugal, no entanto a NAPA (2002) refere que o valor mínimo recomendado de ITSR para as misturas SMA é de 70%.

Tal como se pode verificar no Quadro 5.1, os valores de ITSR obtidos para as misturas de controlo, nomeadamente a mistura com betume convencional e fibras (SMA-B35/50+F) e a mistura com betume modificado comercial (SMA-PMB45/80) são de 87% e 80%, respetivamente. As misturas produzidas com os betumes modificados com óleo e polímeros, designadamente SMA-BO10H6, SMA-BO10S5 e SMA-BO7,5R20 apresentam valores de ITSR mais elevados que as misturas de controlo, nomeadamente 89%, 96% e 88%. Todos os valores de ITSR estão acima dos limites mínimos recomendados para esta propriedade, mesmo quando considerado o valor limite mais conservativo, ou seja, as misturas produzidas com os betumes modificados com óleo e polímeros apresentam elevada resistência à ação da água.

No que concerne à análise dos resultados de sensibilidade à água das misturas com fundo de coluna e polímeros verifica-se que estas apresentam valores de ITSR superiores ao valor recomendado (70%), tal como se pode observar no Quadro 5.1. Contudo, para o valor mais conservativo e mais aceite em Portugal, ou seja, ITSR mínimo de 80%, apenas as misturas com fundo de coluna e HDPE ou SBS apresentam ITSR superiores (87% e 85%, respetivamente).

Com base no Quadro 5.1 é possível também constatar que as misturas com óleo de motor e polímeros exibem valores de ITS dos provetes secos inferiores, em cerca de 52% e 46%, quando comparadas com misturas de controlo SMA-B35/50+F e SMA-PMB45/80, respetivamente. Esta redução de resistência à tração indireta poderá estar relacionada com a introdução do óleo de motor como substituto parcial do

betume, que consequentemente torna a mistura betuminosa menos rígida. Por sua vez, nas misturas com betume modificado com fundo de coluna e polímeros é possível constatar uma redução nos valores de ITS de aproximadamente 60% e 56%, relativamente às misturas de controlo SMA-B35/50+F e SMA-PMB45/80. Apesar da redução de valores de ITS e da elevada quantidade de fundo de coluna usada para substituir parte do betume, o comportamento à ação da água não fica comprometido, tal como foi mencionado anteriormente.

Quadro 5.1. Resultados do ensaio de sensibilidade à água das misturas de controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.

Misturas	Provetes	ITS (kPa)	Deformação (mm)	Volume de vazios (%)	ITSR (%)
SMA-B35/50+F	secos	2037	2,98	6,6	87
	imersos	1777	3,30		
SMA-PMB45/80	secos	1834	3,15	4,5	80
	imersos	1459	2,97		
SMA-BO10H6	secos	949	2,85	3,1	89
	imersos	849	2,84		
SMA-BO10S5	secos	930	2,91	2,9	96
	imersos	897	2,97		
SMA-BO7,5R20	secos	1082	2,22	6,4	88
	imersos	957	2,36		
SMA-BF15H6	secos	770	2,24	3,2	87
	imersos	667	2,44		
SMA-BF12,5S5	secos	948	2,62	2,6	85
	imersos	804	3,00		
SMA-BF15R20	secos	718	2,31	4,4	77
	imersos	550	2,53		

Apesar da resistência à tração não ser muito elevada, todas as misturas com betumes modificados com resíduos apresentam valores de deformação ligeiramente inferiores às misturas convencionais. Para a determinação do volume de vazios foi necessário determinar as características volumétricas de cada mistura, tais como a baridade aparente compreendida entre 2264 e 2381 kg/m³ e a baridade máxima teórica cujos valores variam de 2420 a 2452 kg/m³.

De acordo com a literatura, os valores mínimo e máximo do volume de vazios de uma mistura SMA é de 3% e 6%, respetivamente. Pode assim constatar-se que as misturas com SBS exibem um volume de vazios inferior ao mínimo permitido, o que poderá condicionar o comportamento da mistura à deformação permanente. Contudo, como se utilizam betumes modificados, este volume de vazios inferior ao limite requerido pode não ser condicionante. A mistura de controlo com betume B35/50 e a mistura com óleo de motor usado e borracha apresentam volumes de vazios superiores ao limite máximo requerido. Apesar disso, ambas apresentam um valor de ITSR superior ao valor mínimo recomendado, o que poderá indicar que estes betumes garantem um adequado revestimento dos agregados, não condicionando a adesividade betume/agregado e/ou perda de coesão do betume que a ação da água pode causar. Importa salientar que a otimização da percentagem de betume foi realizada apenas para a mistura de controlo com o betume PMB45/80, mantendo-se esse valor para as restantes misturas por motivos de comparação. Assim, futuramente e após otimização da composição dessas misturas será possível cumprir os requisitos para o seu volume de vazios.

Deste modo, as misturas SMA com betumes modificados com resíduos apresentam uma resistência à água superior aos limites recomendados e muitas vezes superior às misturas de controlo. A introdução destes resíduos (polímeros, óleo de motor ou fundo de coluna) não compromete o desempenho das misturas quando sujeitas à ação da água.

5.3.2. Módulo de rigidez

Os módulos de rigidez das misturas SMA em estudo foram obtidos por meio do ensaio de flexão em 4 pontos sob cargas repetidas, de acordo com norma EN 12697-26, usando provetes prismáticos, às temperaturas de 0, 10, 20 e 30 °C. As curvas mestras dos módulos de rigidez e dos ângulos de fase das diferentes misturas SMA em estudo, para a temperatura de referência de 20 °C, foram obtidas através do *software IRIS*, tendo em conta os fatores de translação descritos pelas equações de *Arrhenius* e o *William-Landel-Ferry* (WLF) e podem ser visualizadas na Figura 5.5.

Através da análise dos resultados é possível observar que os valores do módulo de rigidez e ângulo de fase da mistura com betume modificado comercial e das misturas com óleo de motor e HDPE ou SBS são mais influenciadas pela variação da temperatura, o que poderá dever-se a uma elevada interação entre os polímeros nelas contidas e o betume/óleo de motor, quando comparadas com a mistura de controlo com betume convencional e fibras e com a mistura com borracha. Aliás, as últimas apresentam

elevados módulos de rigidez e/ou baixos ângulos de fase a frequências baixas (equivalentes a elevadas temperaturas), devido ao efeito estabilizador destes aditivos, e reduzidos módulos de rigidez e elevados ângulos de fase a frequências elevadas.

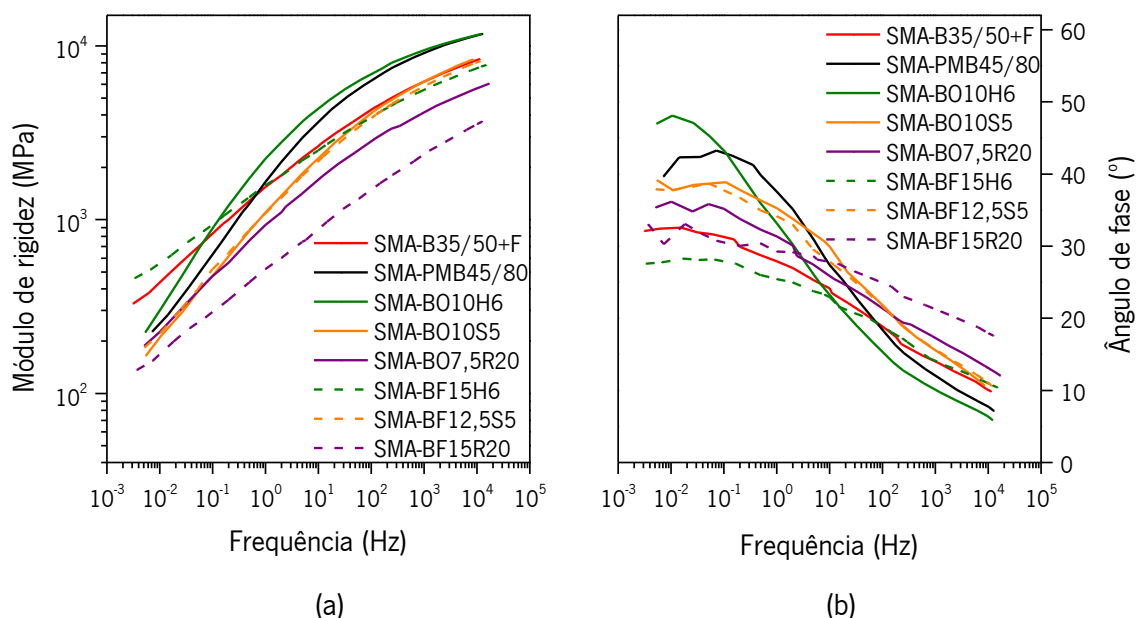


Figura 5.5. Curvas mestras do (a) módulo de rigidez e (b) ângulo de fase ($T_{ref}=20$ °C) das misturas de controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.

No caso das misturas com fundo coluna e HDPE ou CR, assim como da mistura com betume convencional com fibras, não se verifica uma influência tão significativa da variação da temperatura, pois as curvas possuem menor inclinação do que as da mistura com betume modificado comercial e da mistura com fundo de coluna e SBS. Para além disso, estas misturas apresentam maiores módulos de rigidez e/ou menores ângulos de fase a baixas frequências e elevadas temperaturas, o que indica que estes aditivos estabilizam o comportamento destas misturas. Importa salientar que às frequências elevadas (relacionadas com baixas temperaturas), as misturas com fundo de coluna e polímeros assim como a mistura convencional com fibras apresentam baixa rigidez e elevados ângulos de fase, o que demonstra que a mistura com fundo de coluna e SBS apresenta um comportamento semelhante a estas misturas a temperaturas mais baixas.

Desta forma, para países com climas frios e/ou amenos (correspondentes às frequências elevadas na Figura 5.5), as soluções com betume modificado comercial, com HDPE e SBS serão as melhores soluções, pois exibem elevados módulos de rigidez, que podem resultar numa redução da espessura de

pavimento necessário e no custo global do pavimento (assumindo que as misturas apresentam uma vida à fadiga equivalente). Além disso, entre estas três misturas, a mistura com HDPE apresenta um maior módulo de rigidez em toda a gama de frequências analisada, certamente devido ao facto de os plastómeros (i.e. HDPE) conferirem maior rigidez às misturas do que os elastómeros (i.e. usados na produção dos betumes modificados comerciais e SBS).

5.3.3. Resistência ao fendilhamento por fadiga

A durabilidade das misturas SMA deve também ser associada a uma elevada resistência ao fendilhamento por fadiga, cujos resultados são apresentados na Figura 5.6. Tal como se pode verificar, a mistura com óleo de motor e SBS (SMA-BO10S5) apresenta o melhor desempenho à fadiga, até mesmo superior à mistura de referência com betume modificado comercial (SMA-PMB45/80). Este excelente desempenho resulta das propriedades elásticas do polímero SBS, que poderá ter sido melhorada pela combinação do óleo de motor usado como substituto parcial do betume.

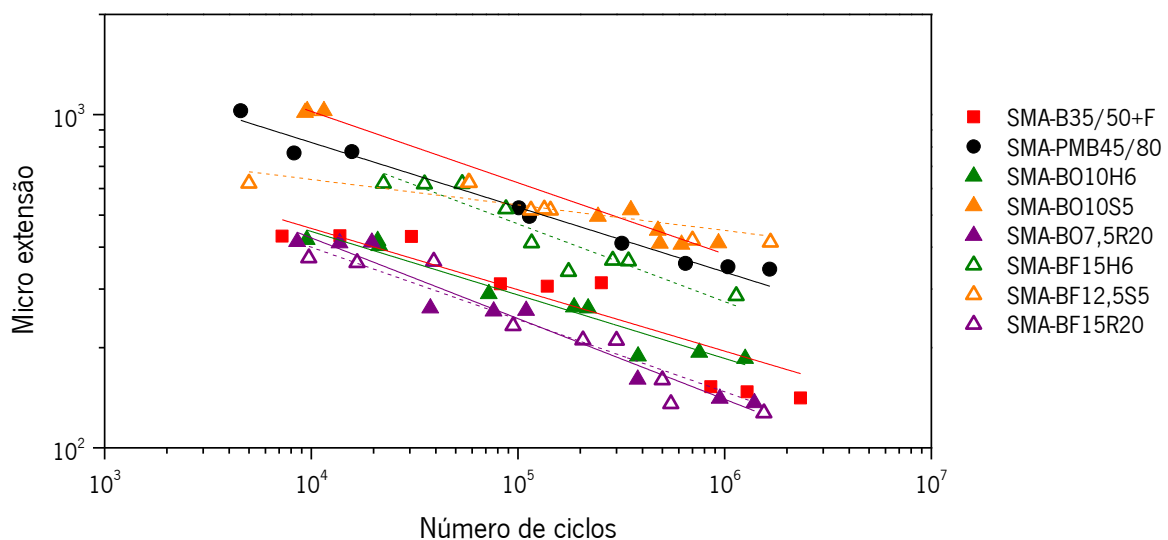


Figura 5.6. Resultados do ensaio fendilhamento por fadiga em flexão em quatro pontos das misturas de controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.

Os resultados de resistência à fadiga das restantes misturas são aceitáveis, apesar de serem inferiores à resistência à fadiga das misturas com SBS e com betume modificado comercial. A mistura com óleo de motor e HDPE (SMA-BO10H6) exibe um desempenho ao fendilhamento por fadiga similar à mistura de referência com betume e fibras (SMA-B35/50+F), mas importa salientar que este resultado foi obtido com a introdução de dois resíduos na mistura, nomeadamente o óleo de motor usado e o HDPE: A

mistura com óleo de motor usado e borracha de pneus apresenta o pior desempenho à fadiga, que pode ser consequência da reduzida interação entre o betume/óleo de motor usado e a borracha de pneu vulcanizada utilizada.

Relativamente à resistência ao fendilhamento das misturas com fundo de coluna e polímeros pode constatar-se que a mistura com betume modificado comercial e as misturas com fundo de coluna e HDPE ou SBS apresentam melhor desempenho à fadiga do que a mistura de controlo com betume convencional e fibras. Adicionalmente, para extensões mais baixas, a mistura com fundo de coluna e SBS apresenta melhor desempenho à fadiga que a mistura SMA-PMB45/80. Devido às suas propriedades elásticas, o polímero SBS utilizado em conjunto com o fundo de coluna condiciona de forma muito positiva a resistência à fadiga da mistura.

Importa ainda salientar que a mistura com fundo de coluna e HDPE (que é um plastómero e não um elastómero) apresenta uma vida à fadiga muito semelhante à da mistura de controlo com betume modificado (SMA-PMB45/80), provavelmente devido à redução do módulo de rigidez que a adição do fundo de coluna causou, afetando positivamente a flexibilidade da mesma. Quanto à mistura com fundo de coluna e borracha de pneus usados, tal como se verificou na mistura com óleo de motor usado e borracha, esta exibiu o pior desempenho à fadiga. Contudo, a sua vida à fadiga não foi muito afetada tendo em conta que se adicionou 15% de fundo de coluna, enquanto na mistura com óleo de motor apenas se utilizou 7,5%.

Tendo em consideração os resultados de fadiga apresentados na Figura 5.6, é possível determinar o número de ciclos até à rutura (resistência à fadiga) resultante da aplicação de uma extensão de tração de 100×10^{-6} (N_{100}) e a extensão de tração que causa uma resistência à fadiga de 1×10^6 ciclos (ϵ_6). Os parâmetros do ensaio de fadiga, incluindo o N_{100} e o ϵ_6 são apresentados no Quadro 5.2.

A precisão destes cálculos, usando as equações da vida à fadiga nas misturas de controlo e nas misturas com óleo de motor usado e polímeros em estudo, é garantida pelos elevados valores do coeficiente de determinação (globalmente superiores a 0,9). As misturas com óleo de motor usado e SBS (SMA-B010S5) ou com betume modificado comercial (SMA-PMB45/80) confirmam o seu excelente desempenho, apresentando uma resistência à fadiga 50 a 80 vezes superior à mistura convencional com fibras (SMA-B35/50+F) e uma extensão de tração que são capazes de suportar em cada ciclo de carga duas vezes superior.

Quadro 5.2. Parâmetros obtidos no ensaio de fendilhamento por fadiga das misturas de controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.

Misturas	Parâmetros da lei de fadiga $\epsilon=a \times N^b$			N_{100} (ciclos)	ϵ_6 (10 ⁶)
	a	b	r^2		
SMA-B35/50+F	3779	-0,223	0,90	1,2E+07	175
SMA-PMB45/80	4439	-0,185	0,98	8,4E+08	346
SMA-BO10H6	2670	-0,194	0,95	2,3E+07	183
SMA-BO10S5	7312	-0,214	0,98	5,3E+08	382
SMA-BO7,5R20	3904	-0,241	0,96	4,0E+06	140
SMA-BF15H6	6487	-0,228	0,88	8,6E+07	276
SMA-BF12,5S5	1433	-0,086	0,79	3,1E+13	439
SMA-BF15R20	3645	-0,236	0,93	4,1E+06	139

O desempenho à fadiga da mistura com HDPE (SMA-BO10H6) pode ser visto como relevante na medida em que apresenta o dobro da resistência à fadiga da mistura SMA-B35/50+F. A mistura com óleo de motor e borracha de pneu (SMA-BO7,5R20) não parece ser uma boa solução, quando comparada com as restantes misturas, pois a sua vida à fadiga é 3 vezes inferior à vida à fadiga da mistura de referência (SMA-B35/50+F). Convém relembrar que todas as misturas foram produzidas com uma percentagem de betume equivalente. Assim, o comportamento à fadiga destas misturas com borracha não deve ser comparado com o elevado desempenho tradicionalmente associado às misturas betuminosas produzidas com betume modificado com alta percentagem de borracha de pneus usados, as quais são produzidas com percentagens de betume significativamente superiores.

Apesar dos coeficientes de determinação de duas das misturas com fundo de coluna e polímeros não apresentarem valores superiores a 0,9, ainda se garante que cerca de 80% dos resultados podem ser correlacionados com a regressão utilizada. Tendo isto em consideração, é possível verificar que a mistura com fundo de coluna e SBS (SMA-BF12,5S5) apresenta claramente o melhor desempenho à fadiga, devido à sua elevadíssima resistência à fadiga ($N_{100} = 3,1 \times 10^{13}$ ciclos).

Por sua vez, a mistura SMA-BF15H6 apresenta uma resistência à fadiga 7 vezes superior à da mistura SMA-B35/50+F e uma extensão de tração 1,6 vezes superior. No caso da mistura SMA-BF15R20, tal como a mistura com óleo e borracha, esta apresenta uma vida à fadiga 3 vezes inferior quando

comparada com a mistura de controlo com fibras, não sendo assim uma solução muito vantajosa ao nível da resistência ao fendilhamento por fadiga.

Comparando as misturas com fundo de coluna e polímeros com as misturas com óleo de motor e polímeros pode constatar-se que há, na sua maioria, uma melhoria do comportamento ao fendilhamento por fadiga por parte das primeiras. No caso da mistura com HDPE, a vida à fadiga aumentou de $2,3 \times 10^7$ (com óleo de motor) para $8,6 \times 10^7$ (com fundo de coluna), o que poderá dever-se à diminuição de rigidez da mistura com fundo de coluna. Por seu lado, a mistura com SBS e fundo de coluna aumentou substancialmente a sua vida à fadiga para extensões mais baixas, enquanto a mistura com borracha e fundo de coluna apresentou uma resistência à fadiga muito semelhante à mistura com borracha e óleo de motor. Pode assim constatar-se que a introdução de maiores quantidades de fundo de coluna melhora/mantém a resistência ao fendilhamento das misturas betuminosas com resíduos.

5.3.4. Resistência à deformação permanente

Os resultados de deformação permanente obtidos no ensaio de pista (*Wheel Tracking Test*), apresentados na Figura 5.7, foram usados para avaliar mecanicamente o desempenho das misturas SMA a temperaturas de serviço elevadas (60 °C).

De um modo geral, todas as misturas apresentam um bom desempenho à deformação permanente, com baixas taxas de deformação, apesar de as misturas em estudo terem uma quantidade mais elevada de betume (5,8%) do que as misturas mais comuns (AC 14 Surf). Mesmo as misturas com SBS que exibem volume de vazios inferiores ao limite mínimo requerido, o que poderia causar um pior comportamento à deformação permanente, apresentam um excelente desempenho.

Importa salientar o excelente desempenho das misturas com os novos betumes modificados com óleo de motor e HDPE, SBS ou CR desenvolvidos neste estudo. De facto, estas misturas apresentam uma melhoria na resistência à deformação permanente quando comparada com a mistura com betume comercial (SMA-PMB45/80), mesmo usando significativas quantidades de óleo de motor usado. A resistência à deformação permanente da mistura de controlo com betume convencional e fibras (SMA-B35/50+F) é similar às misturas com óleo de motor usado e HDPE, SBS ou CR, essencialmente devido ao efeito estabilizador das fibras.

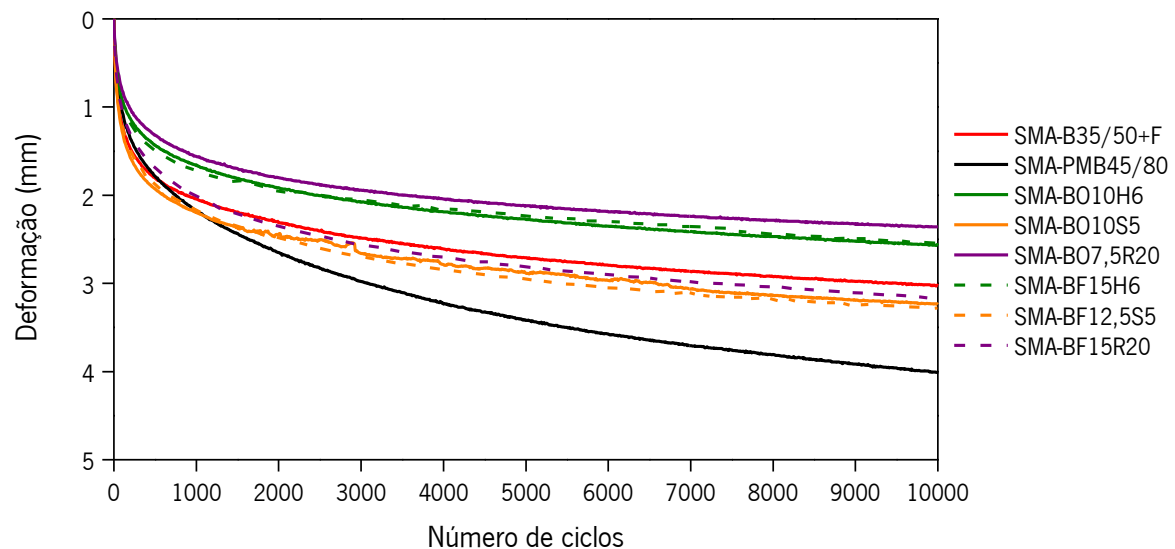


Figura 5.7. Resultados do ensaio de deformação permanente das misturas de referência e das misturas com betumes modificados com resíduos.

No que diz respeito à resistência à deformação permanente das misturas com fundo de coluna e polímeros, estas são claramente superiores à resistência à deformação permanente da mistura com betume modificado comercial apesar da elevada quantidade de fundo de coluna utilizada nos betumes em estudo. Quando comparadas com a mistura com fibras, as misturas com fundo de coluna e SBS ou CR (SMA-BF12,5S5 e SMA-BF15R20) apresentam uma resistência à deformação permanente ligeiramente inferior, o que mostra mais uma vez o efeito positivo das fibras.

Os resultados do ensaio de deformação permanente permitem calcular alguns parâmetros especificados na norma EN 12697-22, nomeadamente a taxa de deformação (WTS_{AIR}), a percentagem da profundidade máxima da rodeira (PRD_{AIR}) e a profundidade máxima da rodeira (RD_{AIR}). Estes parâmetros podem ser visualizados no Quadro 5.3.

Da análise dos parâmetros anteriormente mencionados, é possível confirmar que todas as misturas SMA apresentam um bom desempenho de resistência à deformação permanente. De facto, a mistura produzida com betume modificado comercial (SMA-PMB45/80) apresenta o pior desempenho à deformação permanente, mas os valores de WTS_{AIR} (0,12 mm/10³ ciclos) e PRD_{AIR} (9,97%) são inferiores ou iguais aos valores médios especificados na norma EN 13108-1 para misturas convencionais usadas em trabalhos de pavimentação.

Quadro 5.3. Parâmetros obtidos no ensaio de deformação permanente das misturas de controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.

Misturas	WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	PRD _{AIR} (%)	RD _{AIR} (mm)
SMA-B35/50+F	0,06	7,38	3,03
SMA-PMB45-80	0,12	9,97	4,01
SMA-BO10H6	0,06	6,27	2,57
SMA-BO10S5	0,07	7,97	3,24
SMA-BO7,5R20	0,05	5,76	2,36
SMA-BF15H6	0,06	6,15	2,55
SMA-BF12,5S5	0,06	8,06	3,28
SMA-BF15R20	0,07	7,95	3,17

Importa realçar que o melhor desempenho à deformação permanente resulta da mistura com óleo de motor e borracha de pneus usados, que apresenta os valores mais baixos de WTS_{AIR} (0,05 mm/10³ ciclos) e PRD_{AIR} (5,76%). Quando comparada com as restantes misturas, esta melhoria de comportamento pode estar relacionado com a elevada quantidade de polímero usado na modificação do betume, mas também devido à menor utilização de óleo de motor usado.

Ainda assim, a resistência à deformação permanente das restantes misturas com os novos betumes modificados e a mistura de controlo com betume convencional e fibras é praticamente equivalente (os valores de WTS_{AIR} variam entre 0,06 e 0,07 mm/10³ ciclos).

Comparativamente à mistura com óleo de motor e borracha, a mistura com fundo de coluna e borracha sofreu um decréscimo da sua resistência à deformação permanente, uma vez que a taxa de deformação aumento de 0,05 mm/10³ ciclos para 0,07 mm/10³ ciclos. Contudo, deverá ser realçado que a mistura com fundo de coluna e borracha apresenta uma percentagem de substituto parcial de betume (15%) duas vezes superior à da mistura com óleo (7,5%), o que certamente influenciou esta diferença de comportamento à deformação permanente.

O facto de estes betumes modificados com resíduos apresentarem maiores resistências à deformação permanente comparativamente ao betume modificado comercial (PMB45/80) vai de encontro aos resultados obtidos no ensaio de fluência e relaxamento, uma vez que a taxa de deformação destes

betumes é inferior à obtida para o betume PMB45/80. No entanto, a mistura de controlo SMA-B35/50+F apresenta um desempenho semelhante ao das misturas com resíduos, o que contraria os resultados do ensaio de fluência e relaxamento. Contudo, a utilização de fibras nesta mistura contribui para o aumento da rigidez da mistura e, consequentemente, o aumento da resistência à deformação permanente que não foi contabilizada no ensaio reológico (o betume avaliado não continha fibras).

Importa ainda salientar que o excelente desempenho das misturas com HDPE à deformação permanente não é tão notório no resultado à fluência e relaxamento. Este resultado poderá dever-se ao facto de o ensaio de fluência e relaxamento ser mais indicado para betumes modificados com elastómeros do que para betumes modificados com plastómeros. Contudo, tal como a literatura refere e, como se constatou neste trabalho, a adição de plastómeros aumenta a rigidez das misturas betuminosas, contribuindo para o bom desempenho à deformação permanente.

A representação 3D das amostras das diferentes misturas, obtida através de um perfilómetro com sensor eletro-ótico, permite visualizar o aspeto final da rodeira após ensaio de deformação permanente, assim como, comparar visualmente as suas profundidades. A título de exemplo pode observar-se na Figura 5.8 a representação 3D das amostras das misturas SMA-PMB45/80 e SMA-BF15H6 após o ensaio de deformação permanente.

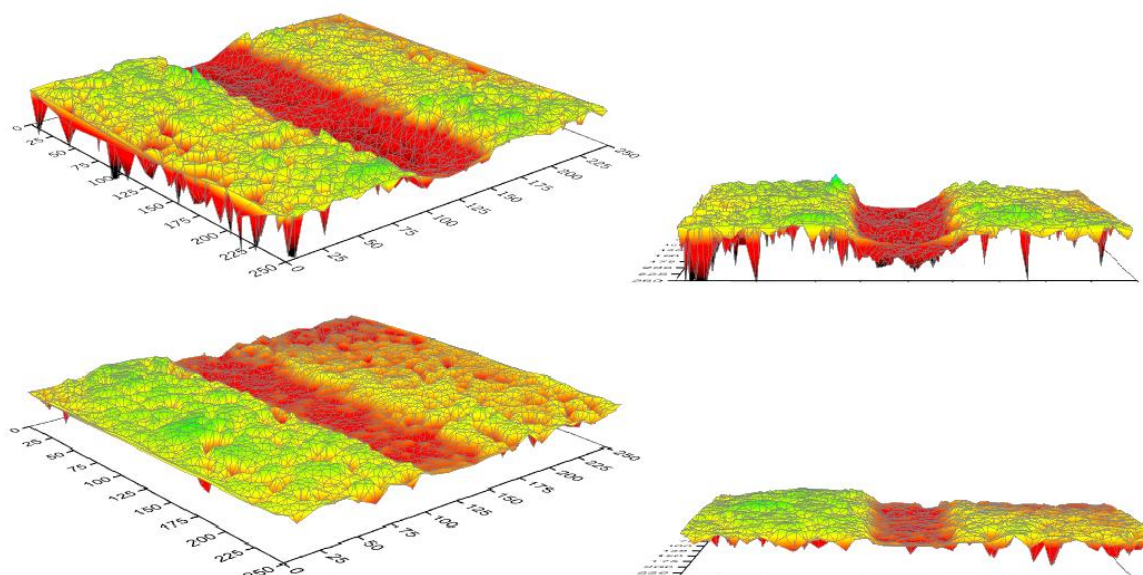


Figura 5.8. Representação 3D das amostras das misturas SMA-PMB45/80 e SMA-BF15H6, respetivamente, após ensaio de deformação permanente.

Pode assim constatar-se visualmente a clara diferença de deformação entre a mistura de controlo SMA-PMB45/80 e a mistura SMA-BF15H6. A mistura de controlo com betume modificado apresenta uma rodeira significativamente mais profunda (ao longo do rodado) do que a mistura com fundo de coluna e HDPE, tal como se verificou nas análises acima descritas.

5.4. Características superficiais das misturas com betumes modificados com resíduos

Uma vez que as misturas SMA são muito utilizadas em camadas de desgaste e, como se utilizou o óleo de motor usado e o fundo de coluna como substituto parcial do betume, achou-se importante determinar as suas características superficiais, nomeadamente a resistência ao deslizamento (EN 13036-4) e a macrotextura, expressa através do valor da profundidade média do perfil (EN13473-1) para garantir a segurança dos utilizadores.

A profundidade média do perfil (*mean profile depth*, MPD) foi medida em laboratório em amostras quadradas de 30 × 30 cm, através de um perfilómetro com sensor eletro-ótico, de acordo com a norma EN 13473-1. O MPD final foi obtido através da média aritmética de todos os MPD obtidos nos perfis de 10 em 10 mm medidos pelo perfilómetro.

As características superficiais das misturas SMA são tipicamente conhecidas pela sua elevada macrotextura, como tal, vários autores referem que a profundidade média do perfil (MPD) deste tipo de misturas deve ser superior a 1,0 mm (Kogbara *et al.*, 2016, Vaiana *et al.*, 2012).

De facto, estas misturas do tipo SMA são compostas por elevadas quantidades de agregados de maior dimensão (74%) que contribuem para um aumento da rugosidade da superfície. Para além disso, a elevada macrotextura facilita a drenagem do pavimento, contribuindo para a redução do efeito de aquaplanagem, bem como, minimiza os salpicos e aspersão da água provocada pela passagem dos pneus dos veículos sobre pavimentos molhados (Vaiana *et al.*, 2012, Yao *et al.*, 2013).

No entanto, tendo em conta que os novos betumes modificados utilizados neste trabalho podem afetar os valores típicos de MPD, essa possibilidade foi avaliada nesta parte do trabalho (Figura 5.9).

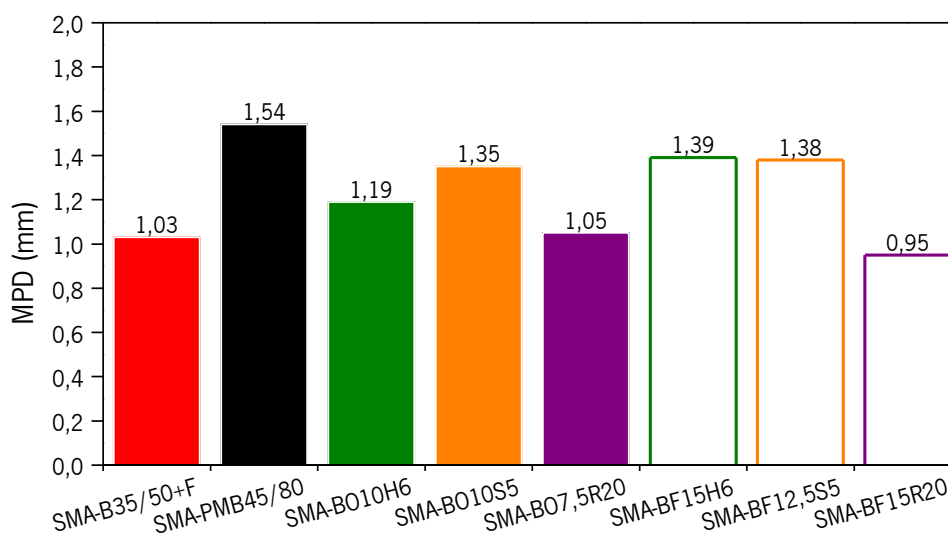


Figura 5.9. Resultados da profundidade média do perfil (MPD) das misturas de controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos

Pode assim concluir-se que todas as misturas SMA com óleo de motor e polímeros apresentam valores de MPD superiores a 1,0 mm, como requerido para este tipo de mistura para assegurar a segurança e o conforto dos condutores. Para além disso, é de salientar que as misturas SMA com estes novos betumes que incorporam diferentes resíduos exibem valores de MPD superiores comparativamente à mistura de controlo com betume convencional e fibras (SMA-B35/50+F).

Ao nível da profundidade média do perfil (MPD), tal como pode ser observado na Figura 5.9, apenas a mistura com fundo de coluna e borracha (SMA-BF15R20) apresenta valor de MPD inferior ao valor recomendado para as misturas SMA (1,0 mm). Apesar disso, o valor de MPD (0,95 mm) é bastante próximo do mínimo recomendado, mesmo tendo em consideração a adição de 15% de fundo de coluna. Por sua vez, as misturas com fundo de coluna e HDPE ou SBS (SMA-BF15H6 e SMA-BF12,5S5) apresentam valores de MPD (1,39 e 1,38 mm, respetivamente) superiores ao da mistura com fibras (1,03 mm) mas inferiores ao da mistura com betume modificado comercial (1,54mm).

Importa salientar que apesar do aumento da quantidade de fundo de coluna nestas misturas relativamente à quantidade de óleo de motor usado nas misturas anteriores, os valores de MDP aumentaram, com a exceção da mistura com borracha. Contudo, nessa mistura a quantidade de fundo de coluna utilizada foi de 15%, enquanto a quantidade de óleo de motor era 7,5%, isto é, utilizou-se o dobro da quantidade de fundo de coluna para a mesma quantidade de polímero, sofrendo apenas uma

redução de 0,10 mm no valor de MPD. Deste modo, a introdução de maiores quantidades de fundo de coluna praticamente não condiciona ou até melhora as características superficiais do pavimento, no que concerne à profundidade média do perfil, o que poderá facilitar a drenagem superficial, bem como, minimizar o efeito de aspersão e salpicos de água.

A utilização de significativas quantidades de óleo de motor usado em alguns dos betumes desenvolvidos para a produção das misturas SMA pode afetar negativamente resistência ao deslizamento (atrito) das mesmas, justificando-se a avaliação deste parâmetro neste estudo. Consequentemente, foi realizado o ensaio do pêndulo Britânico nas amostras das misturas produzidas em laboratório, sem nenhum desgaste, de modo a enfatizar o possível efeito do filme de betume superficial nas características superficiais das misturas.

Da análise dos resultados deste ensaio (Figura 5.10) é possível concluir que, por um lado, as misturas SMA com óleo de motor e HDPE ou SBS apresentam menor resistência ao deslizamento (60 a 64 unidades PTV) em comparação com a mistura com betume convencional e fibras (66 unidades PTV). Por outro lado, a mistura com óleo de motor usado e borracha de pneu usado (SMA-BO7,5R20) manteve/melhorou a resistência ao deslizamento (67 unidades PTV) comparativamente às misturas de controlo, sobretudo devido ao efeito positivo que as partículas de borracha e a menor quantidade de óleo de motor usado, neste caso.

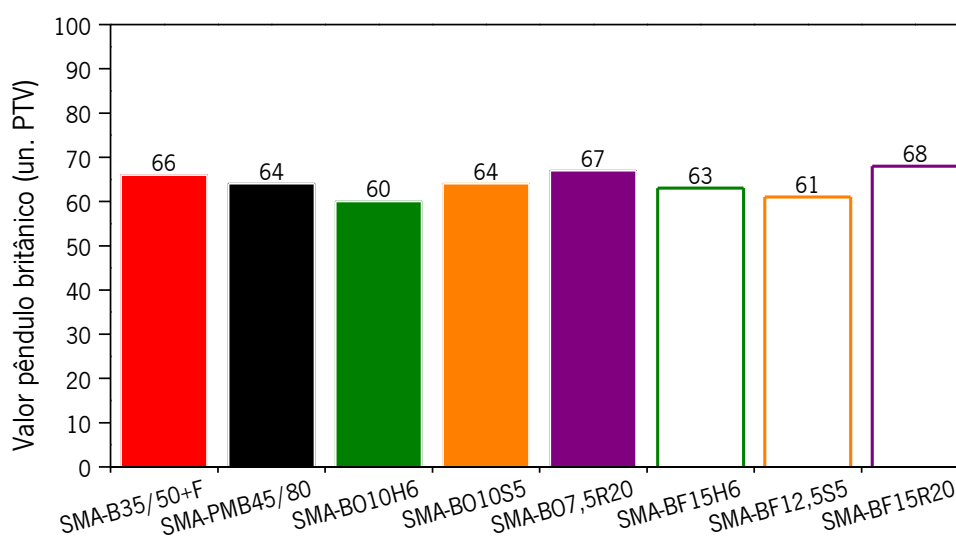


Figura 5.10. Resultados do pêndulo Britânico das misturas controlo e das misturas com betumes modificados com resíduos.

Para além disso, pode observar-se que, apesar da elevada quantidade de fundo de coluna, a mistura com fundo de coluna e borracha (SMA-BF15R20) apresenta a melhor resistência ao deslizamento (68 unidades PTV). Ainda que as misturas SMA-BF15H6 e SMA-BF12,5S5 apresentem valores de resistência ao deslizamento (63 a 61 unidades PTV) inferiores às misturas de controlo, o seu desempenho ao deslizamento não se encontra comprometido.

De acordo com a especificação portuguesa (EP, 2014) o valor mínimo da resistência ao deslizamento em camada de desgaste é de 60 unidades PTV, verificando-se que todas as misturas SMA estudadas cumprem o requisito exigido, assegurando assim a segurança necessária para os condutores.

6. DESENVOLVIMENTO DE BETUMES MODIFICADOS COM RESÍDUOS PARA MISTURAS RECICLADAS

6.1. Introdução

Nesta fase vão estudar-se betumes modificados com resíduos para misturas recicladas, de modo a avaliar se é possível conciliar os novos betumes desenvolvidos neste trabalho à tecnologia de reciclagem de misturas betuminosas. Esses betumes têm a particularidade de serem constituídos por betume envelhecido (proveniente do material fresado) e por betumes modificados com resíduos que se adequem a este novo tipo de misturas. A proporção entre esses dois betumes das misturas recicladas vai depender, à partida, da percentagem de betume envelhecido já existente no material fresado e da percentagem de betume modificado com resíduos a adicionar, que em conjunto devem corresponder à percentagem de betume de formulação a definir para a mistura reciclada em estudo.

Assim, para se estudar os betumes das misturas recicladas é necessário, em primeiro lugar, definir a curva granulométrica dessas misturas, para se conhecer qual a percentagem de material fresado (fração grossa e fina) a utilizar, e a correspondente percentagem de betume envelhecido já contida na mistura. Em segundo lugar é necessário realizar o estudo de formulação *Marshall* da mistura reciclada, de modo a determinar a percentagem ótima de betume da mistura e, assim, ficar a conhecer a percentagem de betume modificado com resíduos que deve ser adicionada ao betume envelhecido.

Depois de definida a proporção entre o betume modificado com resíduos e o betume envelhecido que existe nas misturas recicladas, procedeu-se ao estudo desses betumes para as várias soluções de betumes modificados com resíduos que se considerou serem adequados para utilização nessas misturas. Inicialmente foi realizado um estudo das suas propriedades básicas para uma seleção inicial dos betumes mais promissores. Finalmente fez-se uma caracterização mais avançada dos betumes selecionados, de modo a selecionar os betumes mais promissores a aplicar na produção das misturas recicladas.

6.2. Betumes modificados com resíduos que se adequam à produção de misturas recicladas

Uma vez que o betume envelhecido do material fresado apresenta uma penetração muito baixa (8,8 décimas de milímetro), e dado que se pretende que a mistura reciclada tenha 50% de material fresado,

é necessário introduzir um novo betume modificado com uma penetração mais elevada para se obter um betume final da mistura reciclada com uma penetração típica dos betumes mais utilizados na pavimentação rodoviária em Portugal, nomeadamente os betumes 35/50 ou 50/70. Assim, definiu-se que os betumes modificados com resíduos que se adequam a esta utilização deveriam possuir características de um betume modificado do tipo PMB75/130 (com uma penetração compreendida entre os 75 e 130 décimas de milímetro e uma temperatura de amolecimento igual ou superior a 55 °C).

Na impossibilidade de obter um betume modificado comercial de elevada penetração (PMB 75/130), que não é fornecido para Portugal, que seria usado como betume de controlo e para a formulação das misturas, optou-se por utilizar um betume convencional de elevada penetração (B160/220) para produzir as misturas de controlo (tendo por base o estudo de Abreu (2017)). As características do betume de controlo, bem como dos betumes modificados com resíduos que se adequam à utilização em misturas recicladas (pois apresentam características de um betume PMB75/130) e que maximizam a utilização de resíduos, podem ser consultadas no Quadro 6.1. De referir que estes betumes modificados com resíduos já foram descritos anteriormente (Capítulo 4).

Quadro 6.1. Caracterização básica do betume de controlo e dos betumes modificados com resíduos que se adequam à produção de misturas recicladas.

Betume	Penetração a 25 °C (0,1 mm)	Temperatura de amolecimento (°C)	Resiliência (%)	Temperatura de Produção (°C)
B160/220	191	38	0	130
BO15H6	82	113	9	180
BO20H6	106	109	7	180
BO15S5	97	86	16	180
BO20S5	117	82	17	180
BO15R20	81	59	18	180
BO20R20	128	55	13	180
BF17,5H6	83	84	1	180
BF20H6	101	87	5	180
BF17,5S5	90	89	24	180
BF20S5	105	82	31	180
BF20R20	110	49	10	180
BF22,5R20	117	48	7	180

Pode constatar-se que foram selecionados dois betumes por cada tipo de polímero e por cada tipo de substituto parcial utilizado (óleo de motor ou fundo de coluna). Para além disso, verifica-se que os betumes modificados com fundo de coluna e polímeros apresentam penetrações na mesma ordem de grandeza dos betumes modificados com óleo de motor usado e polímeros, apesar de utilizarem maior quantidade de substituto parcial. De salientar que as temperaturas de amolecimento dos betumes modificados com fundo de coluna e borracha não cumprem o limite mínimo exigido, mas foram as combinações que mais se aproximaram desse limite. Tal como verificado em situações anteriores, e por comparação com o HDPE ou SBS, a borracha de pneu tem uma menor interação com o betume/óleo de motor ou fundo de coluna, atuando mais como filer, e por isso tem uma menor influência no desempenho dos betumes a temperaturas elevadas. Importa salientar que a seleção dos betumes modificados com fundo de coluna teve em conta os resultados preliminares dos betumes modificados com óleo de motor usado, de modo a ajustar as percentagens a utilizar.

6.3. Formulação e estudo das condições de produção das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos

Depois de definidos os betumes modificados com resíduos que mais se adequam à produção de misturas recicladas, em seguida iniciou-se a formulação dessas misturas. Nesse sentido, começou por definir-se qual o tipo mistura reciclada a estudar, como sendo uma mistura *Stone Mastic Asphalt* para camada de desgaste (SMA 14) com 50% de material fresado. Não é habitual utilizar elevadas quantidades de material fresado nestas misturas SMA, pela dificuldade em ajustar a granulometria contínua do material fresado à curva granulométrica descontínua das misturas SMA. No entanto, neste trabalho considerou-se fundamental que as misturas recicladas e as misturas sem material fresado (Capítulo 5) fossem do mesmo tipo, para se poder comparar o seu desempenho. Além disso, o material fresado encontrava-se dividido em duas frações (grossa e fina), o que facilitou o ajuste granulométrico dessa mistura.

Em relação ao ajuste da curva granulométrica da mistura SMA reciclada, e dado que estas misturas apresentam uma granulometria descontínua, foi necessário utilizar uma maior quantidade da fração grossa (35%) do que da fração fina (15%) do material fresado de modo a cumprir os limites estipulados para este tipo de misturas. Importa salientar que as proporções de material fresado da fração grossa e fina condicionaram a percentagem efetiva de betume envelhecido (2,3%) contida na mistura SMA reciclada. Em relação aos agregados novos e ao filer, foi necessário adicionar 47% da fração 6/14 e 3% de filer, não sendo necessária a utilização da fração 0/4 devido à utilização do material fresado fino.

Na Figura 6.1 apresenta-se a curva granulométrica adotada para as misturas SMA recicladas em estudo, que resultou das percentagens de material fresado, agregados e filler atrás referidos, assim como os limites obrigatórios especificados na norma EN 13108-5 para misturas do tipo SMA 14. Importa salientar que tal como nas misturas sem material fresado (Capítulo 5) tentou-se aproximar a curva granulométrica destas misturas às curvas referidas na literatura, de modo a garantir uma curva granulométrica típica de uma mistura SMA.

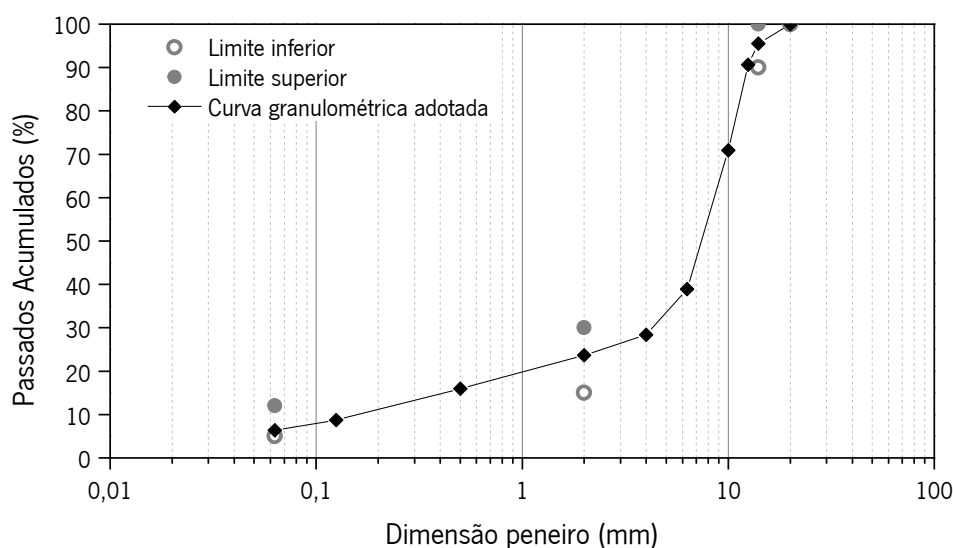


Figura 6.1. Limites especificados de uma mistura SMA 14 e curva granulométrica da mistura de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.

Tendo em consideração que o SBS é um dos polímeros mais utilizados na modificação de betumes para pavimentação e que a formulação das misturas sem material fresado foi realizada com um betume modificado, nesta fase optou-se por realizar a formulação das misturas recicladas com um dos betumes modificados com SBS e óleo de motor usados desenvolvidos neste estudo (B015S5 ou B020S5).

Dos dois betumes modificados com óleo de motor usado e SBS referidos, apenas será utilizado na formulação *Marshall* aquele que, após ser adicionado ao betume envelhecido, apresentar características similares a um betume convencional do tipo B35/50 ou B50/70. Assim, para seleção do betume a utilizar foram adicionadas ao betume envelhecido diferentes quantidades dos dois betumes modificados com óleo de motor e SBS atrás indicados, de modo a obter as percentagens de betume pretendidas para o estudo de formulação *Marshall* da mistura SMA reciclada (5,3%, 5,8%, 6,3%, 6,8% e 7,3%). Essas percentagens são iguais às utilizadas no Capítulo 5 para formulação das misturas SMA sem material fresado.

De referir que a percentagem de betume modificado com resíduos (BO15S5 ou BO20S5) a adicionar resulta sempre da subtração entre a percentagem de betume pretendida para a mistura reciclada e os 2,3% de betume envelhecido do material fresado.

A adição dos betumes modificados com resíduos ao betume envelhecido procurou simular as condições de produção das misturas recicladas, sendo realizada no misturador de baixo corte, a 350 rpm, durante 2 min, a uma temperatura de 180 °C (temperatura de produção, quer do betume envelhecido, quer dos betumes modificados com resíduos). Os betumes da mistura reciclada modificados com óleo de motor e SBS foram caracterizados quanto à penetração a 25 °C, temperatura de amolecimento e viscosidade dinâmica para as diferentes percentagens de betume de formulação. Os resultados de penetração e temperatura de amolecimento, bem como os limites de penetração definidos para seleção dos betumes das misturas recicladas (35 a 70 décimas de milímetro), podem ser observados na Figura 6.2.

De referir que, no que concerne à nomenclatura dos betumes das misturas recicladas modificados com resíduos, estes seguem uma estrutura semelhante à dos betumes modificados com resíduos (antes da sua adição ao betume envelhecido), mas adicionou-se a letra “R” para sugerir a presença do betume envelhecido do material fresado, passando a denominar-se “RBaXbY”.

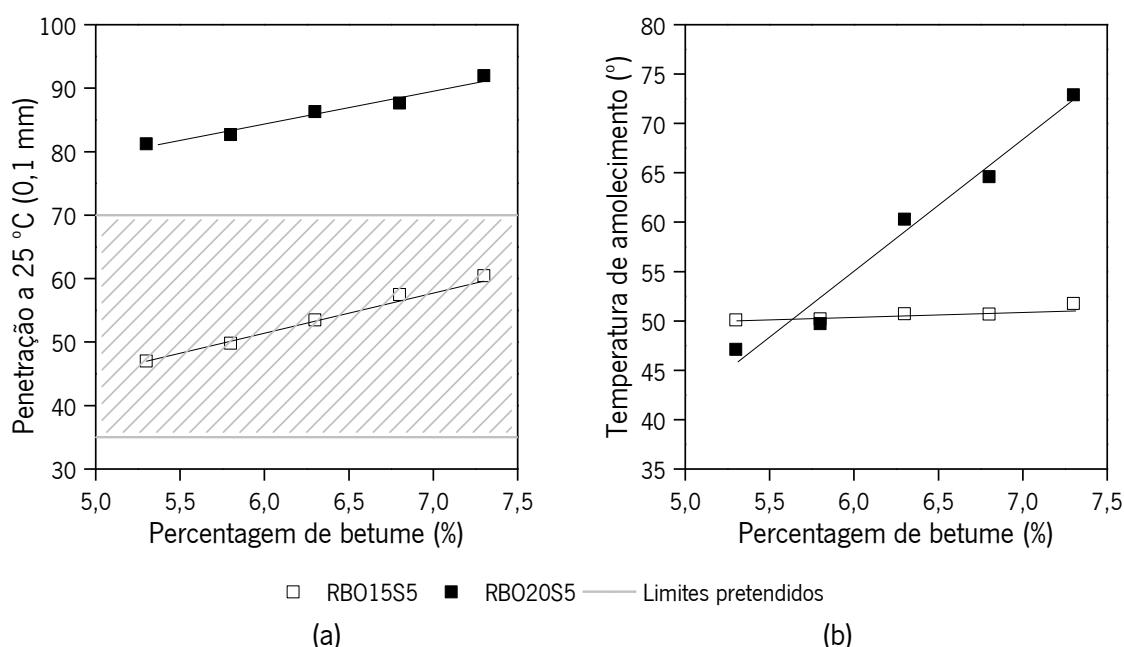


Figura 6.2. Resultados de (a) penetração e (b) temperatura de amolecimento dos betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor e SBS a utilizar para formulação *Marshall*.

O betume das misturas recicladas modificado com 15% de óleo de motor usado e 5% de SBS (RBO15S5) apresenta para todas as percentagens de betume utilizadas na formulação *Marshall* uma penetração compreendida entre os limites definidos neste trabalho (semelhança aos betumes 35/50 ou 50/70).

Para além disso, outra vantagem deste betume é o facto da temperatura de amolecimento ser pouco sensível à variação da percentagem de betume da mistura reciclada, cujos valores são sempre superiores a 50°C (valor que se enquadra nas propriedades dos betumes 35/50 ou 50/70).

Por sua vez, o betume das misturas recicladas modificado com 20% de óleo de motor usado e 5% de SBS (RBO20S5) exhibe valores de penetração muito superiores ao limite de 70 décimas de milímetro, para a toda a gama de percentagens de betume avaliadas.

Além disso, os valores de temperatura de amolecimento variam bastante em função da percentagem de betume da mistura reciclada. Tal facto poderá estar relacionado com a maior quantidade de óleo de motor usado nesse betume, que além de aumentar o rejuvenescimento do betume envelhecido (aumento de penetração), também melhora a dispersão do SBS nesse betume, evidenciando assim propriedades conferidas por esse polímero (elevados valores de temperatura de amolecimento e uma boa resistência à deformação permanente).

Deste modo, o betume seleccionado para o estudo de formulação *Marshall* foi o betume B015S5, uma vez que cumpre os valores de penetração definidos para este estudo. Este betume apresenta uma temperatura de produção (correspondente a uma viscosidade dinâmica de 0,3 Pa.s) e compactação (correspondente a uma viscosidade dinâmica de 2 Pa.s) de 180 °C e 135 °C, respetivamente.

Para realizar o estudo de formulação foi necessário produzir misturas SMA recicladas com o betume referido (B015S5), tendo por base um processo com três etapas. A primeira contempla a adição dos novos agregados, filler e fração grossa do material fresado (35 %), a uma temperatura obtida através da soma de 30 °C à temperatura de produção definida para cada betume, durante 1 minuto, de forma a obter uma mistura homogénea. Na segunda etapa, a fração fina do material fresado é introduzida na mistura anterior à temperatura ambiente, durante 2 minutos, para garantir que toda a mistura fica à mesma temperatura. Por último, o betume convencional ou os betumes modificados com resíduos são adicionados à mistura reciclada, durante 2 minutos, à temperatura de produção correspondente.

Este procedimento é baseado num estudo realizado por Palha *et al.* (2013), e simula as condições de produção efetivamente utilizadas numa central descontínua que permite produzir misturas recicladas. Importa salientar que ao produzir a mistura reciclada de controlo, com betume convencional, durante a segunda etapa do processo de produção foram adicionadas fibras acrílicas à temperatura ambiente.

Para a produção das misturas SMA recicladas com as diferentes percentagens de betume selecionadas para o estudo de formulação *Marshall* (utilizando o betume modificado com 10% de óleo de motor e 5% de SBS), foram preparados provetes no compactador de impacto, tal como referido na formulação *Marshall* das misturas sem material fresado (Capítulo 5).

Além disso, foi determinada a resistência ao escorrimento dessas misturas, de acordo com a norma EN 12697-18. Em seguida fez-se a caracterização volumétrica desses provetes, e avaliou-se a sua estabilidade *Marshall* (EN 12697-34). Os resultados do estudo de formulação *Marshall* são apresentados na Figura 6.3.

Da análise dos resultados da Figura 6.3, e de acordo com as indicações do anexo nacional da norma EN 13108-1, foi possível obter uma percentagem ótima de betume de 6,0%. Contudo, devido à proximidade deste valor com a percentagem ótima de betume obtida para as misturas betuminosas SMA sem material fresado, optou-se por selecionar o valor de 5,8% como percentagem de betume a utilizar posteriormente nestas misturas SMA recicladas (para efeito de comparação de resultados).

Assim, para a percentagem de betume selecionada a mistura SMA reciclada tem as seguintes propriedades: i) baridade aparente de 2274 kg/m³; ii) estabilidade de 16 kN; iii) deformação de 3,41 mm; iv) volume de vazios de 4,1%; v) VMA de 17,7%, e; vi) escorrimento de 0,10 %. Tal como se verificou no Capítulo 5, os valores de percentagem de betume, volume de vazios, VMA e escorrimento obtidos na formulação das misturas recicladas vão de encontro aos limites mencionados na literatura.

Após determinação da percentagem de betume a utilizar nas misturas SMA recicladas, torna-se possível o estudo e seleção dos betumes modificados com resíduos que efetivamente constituem essas misturas. Assim, tendo em conta os betumes modificados com resíduos selecionados anteriormente (Secção 6.2), é necessário estudar o seu comportamento após adição ao betume envelhecido de modo a determinar as propriedades dos betumes finais das misturas recicladas.

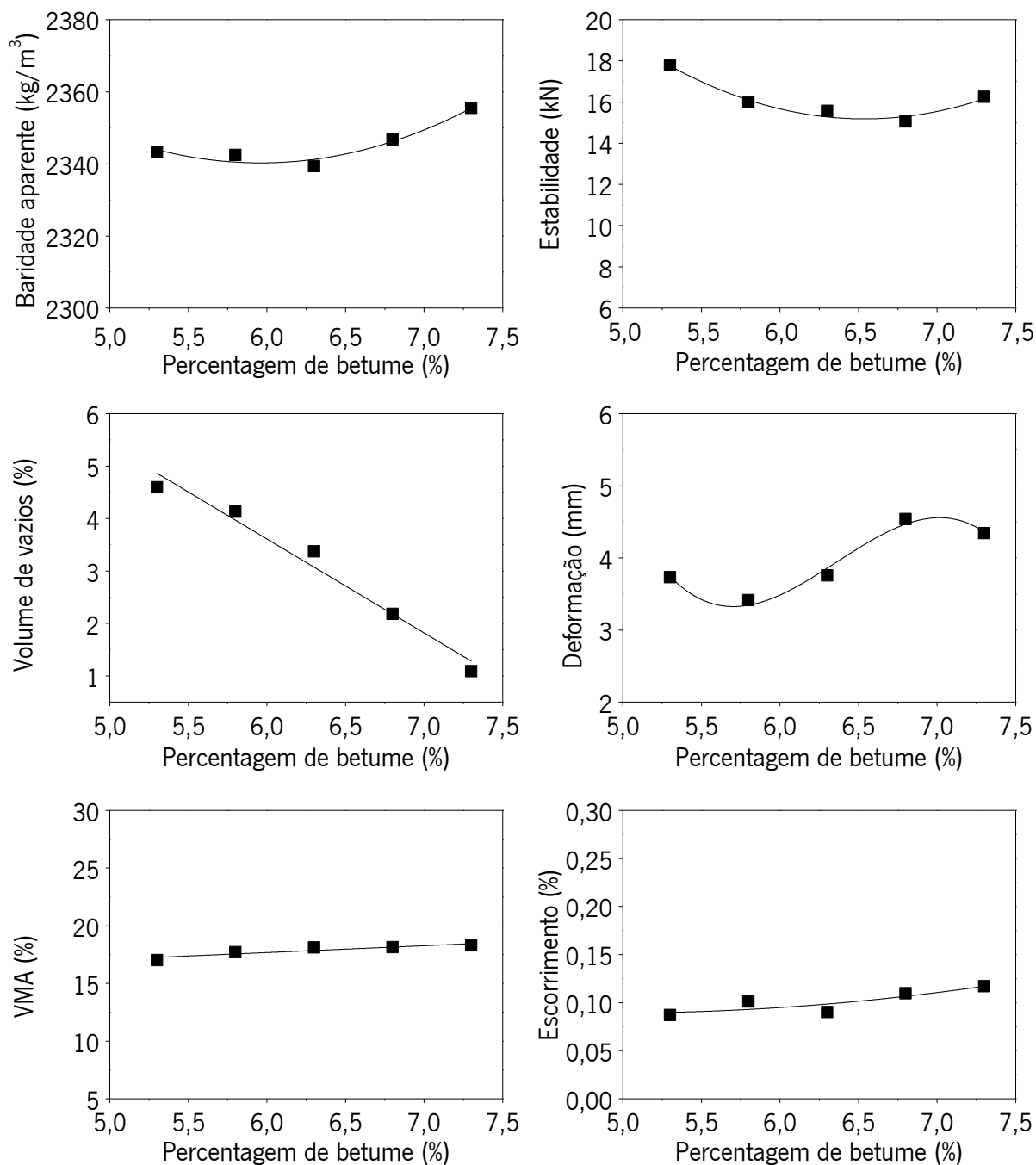


Figura 6.3. Resultados do estudo de formulação *Marshall* da mistura reciclada SMA-RBO15S5.

6.4. Seleção dos betumes das misturas recicladas modificados com resíduos

Os betumes das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos, cuja percentagem final nas misturas recicladas é de 5,8%, foram produzidos através da adição dos betumes modificado com resíduos (3,5%) indicados no Quadro 6.1 ao betume envelhecido do material fresado (2,3%), na proporção em que existem na mistura reciclada.

Para além dos betumes modificados com resíduos, também foi estudada a adição de um betume convencional B160/220 que foi utilizado como betume de controlo. Nesse sentido, o betume da mistura reciclada de controlo RB160/220 apresentou uma penetração de $63 \times 0,1$ mm, uma temperatura de amolecimento de 47°C e temperaturas de produção e compactação correspondentes a 150°C e 130°C , respetivamente (determinadas com base nos resultados de viscosidade). Assim, este betume da mistura reciclada de controlo RB160/220 tem características de um betume do tipo 50/70.

Em seguida, procedeu-se à seleção dos betumes das misturas recicladas modificados com resíduos que apresentam valores de penetração e temperatura de amolecimento típicas de betumes convencionais (i.e. betumes do tipo B35/50 e B50/70), e que ao mesmo tempo maximizam a utilização de resíduos. Para tal, os betumes foram caracterizados através das suas propriedades básicas, ou seja, penetração a 25°C (de acordo com a norma EN 1426), temperatura de amolecimento (de acordo com a norma EN 1427) e viscosidade dinâmica (de acordo com a norma EN13302).

6.4.1. Betumes modificados com derivados de óleo de motor e HDPE

As propriedades básicas dos betumes das misturas recicladas modificados com HDPE podem ser visualizadas na Figura 6.4 e Figura 6.5 para duas percentagens de óleo de motor usado (15 e 20%) ou de fundo de coluna (17,5 e 20%).

Ao nível dos valores de penetração verifica-se que os betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado apresentam maiores valores de penetração. Para além disso, o aumento dos valores de penetração com o aumento da percentagem de substituto parcial é mais notório para os betumes com óleo do que nos betumes com fundo de coluna. Ou seja, para a mesma percentagem de substituto parcial (20%), o valor de penetração do betume RBO20H6 é de $89 \times 0,1$ mm, enquanto no betume com fundo de coluna RBF20H6 é de apenas $71 \times 0,1$ mm.

Os betumes das misturas recicladas modificados com fundo de coluna exibem temperaturas de amolecimento semelhantes (50 e $50,4^\circ\text{C}$) para diferentes quantidades de fundo de coluna. O mesmo não acontece nos betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado, cujas temperaturas de amolecimento decrescem com o aumento da quantidade de substituto parcial (de 52°C para 47°C). Assim, os betumes das misturas recicladas modificados com fundo de coluna são menos suscetíveis às variações da quantidade de substituto parcial do que os betumes com óleo usado.

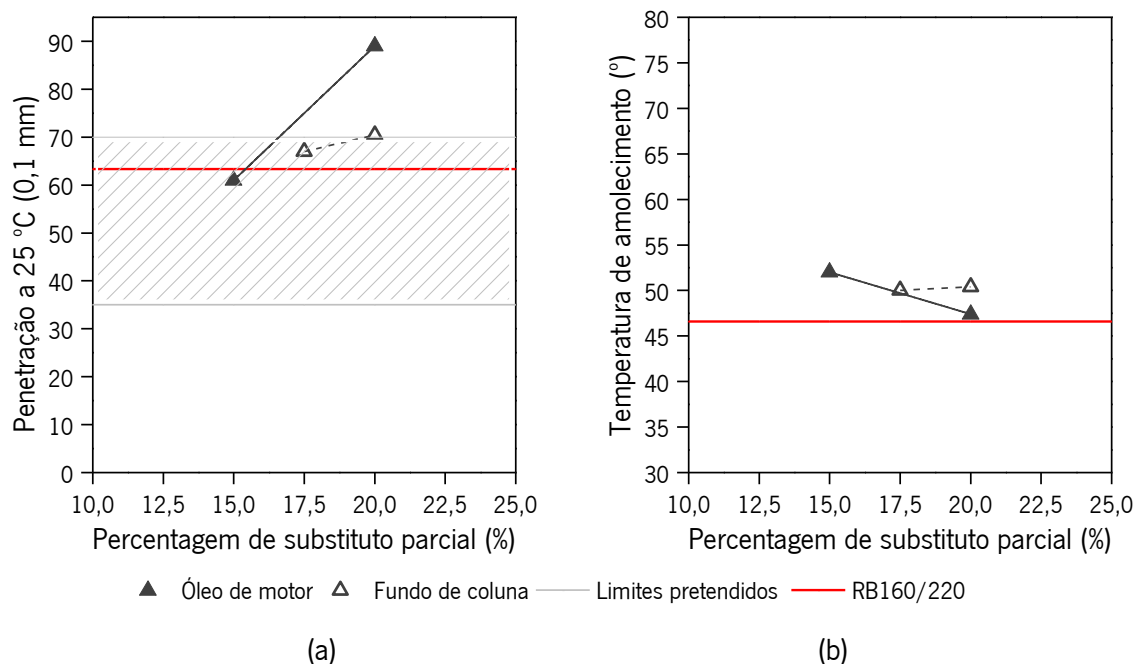


Figura 6.4. Resultados de (a) penetração e (b) temperatura de amolecimento dos betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 6% de HDPE.

Em resumo, os betumes das misturas recicladas modificados com HDPE que cumprem os dois critérios de seleção previamente mencionados são o betume das misturas recicladas modificado com 15% de óleo de motor usado e 6% de HDPE (RBO15H6) e o betume das misturas recicladas modificado com 17,5% de fundo de coluna e 6% de HDPE (RBF17,5H6).

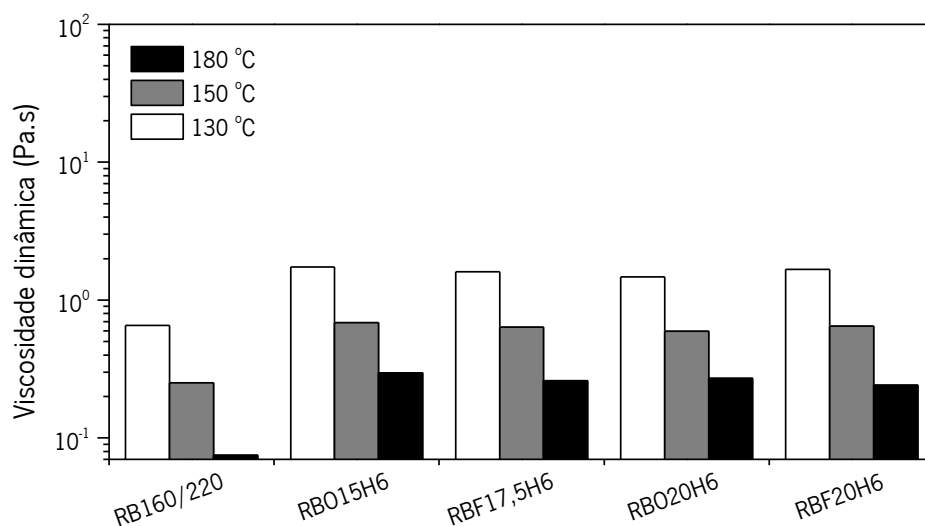


Figura 6.5. Viscosidade dinâmica dos betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 6% de HDPE.

Os diferentes betumes das misturas recicladas modificados com HDPE e óleo de motor usado ou fundo de coluna, apresentam valores de viscosidade dinâmica (Figura 6.5) superiores ao betume da mistura reciclada de controlo RB160/220, para todas as temperaturas em análise. Pode ainda constatar-se que estes betumes exibem viscosidades muito semelhantes entre si, independentemente da quantidade e tipo de substituto parcial usado. Tal comportamento poderá estar relacionado com o facto do betume envelhecido do material fresado ter maior influência na viscosidade dos betumes finais das misturas recicladas do que os betumes modificados com resíduos. Com base nestes resultados, a temperatura de produção e compactação destes betumes é de cerca de 180 °C e 135 °C, respetivamente.

6.4.2. Betumes modificados com derivados de óleo de motor e SBS

O tipo de análise efetuado aos betumes das misturas recicladas modificados com HDPE e óleo de motor usado ou fundo de coluna também foi realizado, em seguida, para os restantes polímeros em estudo (SBS e CR). Assim, as propriedades básicas dos betumes das misturas recicladas modificados com SBS são apresentadas na Figura 6.6 e Figura 6.7. As percentagens dos respetivos substitutos parciais são iguais às indicadas para os betumes das misturas recicladas com HDPE, isto é, 15 e 20% para o óleo de motor usado e 17,5 e 20% para o fundo de coluna.

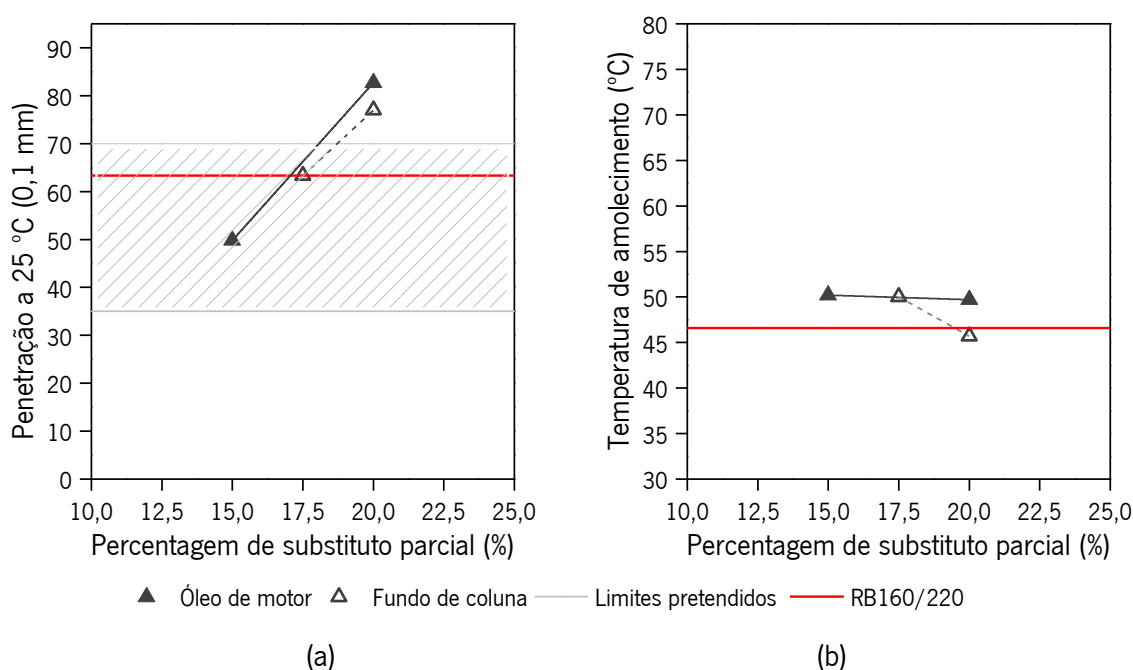


Figura 6.6. Resultados de (a) penetração e (b) temperatura de amolecimento dos betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 5% de SBS.

Nos betumes das misturas recicladas modificados com SBS verifica-se que o aumento dos valores de penetração é similar ao utilizar óleo de motor usado ou fundo de coluna, ainda que os valores de penetração dos últimos sejam ligeiramente inferiores. Ao utilizar 20% de substituto parcial nestes betumes das misturas recicladas modificados com SBS, verifica-se que o valor da penetração é superior ao limite superior definido neste trabalho ($70 \times 0,1$ mm), quer ao utilizar óleo de motor usado, quer ao utilizar fundo de coluna. Assim, devem utilizar-se quantidades inferiores destes materiais.

Relativamente à temperatura de amolecimento dos betumes das misturas recicladas modificados com SBS, verifica-se o seu decréscimo com o aumento da quantidade de fundo de coluna (de 50°C para 46°C), e a manutenção do seu valor (cerca de 50°C) ao utilizar diferentes quantidades de óleo de motor usado.

De acordo com os resultados obtidos, os betumes das misturas recicladas modificados com SBS que cumprem os dois critérios de seleção previamente definidos são os betumes RBO15S5 (betume das misturas recicladas com 15% de óleo de motor usado e 5% de SBS) e RBF17,5S5 (betume das misturas betuminosas recicladas modificado com 17,5% de fundo de coluna e 5% de SBS). Apesar de a tendência mostrar que o betume das misturas recicladas modificado com 17,5% de óleo de motor usado e 5% de SBS cumpria os limites de penetração estipulados, optou-se pela utilização de um valor mais conservativo (15%).

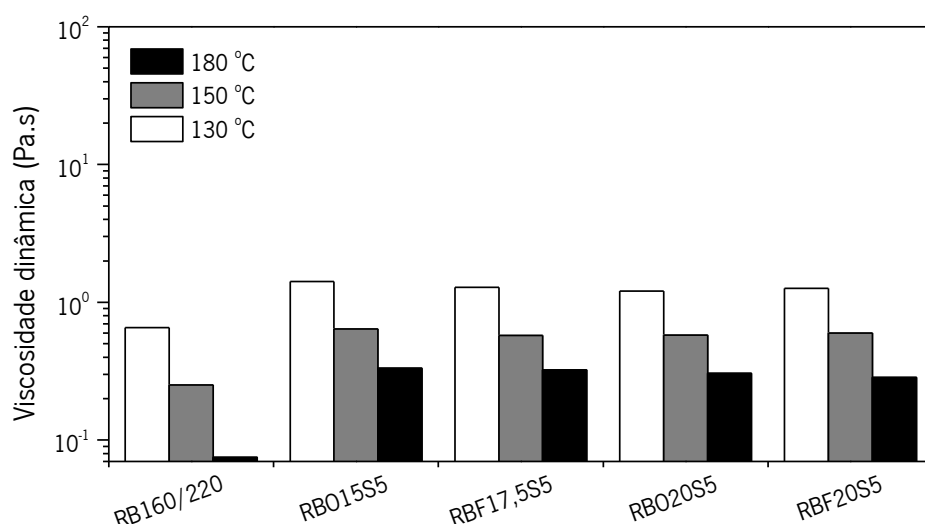


Figura 6.7. Viscosidade dinâmica dos betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 5% de SBS.

Tal como se verificou anteriormente para o polímero HDPE, os betumes destas misturas recicladas modificados com SBS também apresentam uma viscosidade dinâmica superior ao betume das misturas recicladas de controlo, mas que são semelhantes entre si para os dois tipos e quantidades de substituto parcial utilizado. Além disso, os resultados de viscosidade mostram que a temperatura de produção destes betumes é cerca de 180 °C, e a temperatura de compactação é de aproximadamente 135 °C.

6.4.3. Betumes modificados com derivados de óleo de motor e borracha

No caso dos betumes das misturas recicladas modificados com borracha, duas percentagens de óleo de motor usado (15% e 20%) ou de fundo de coluna (20% e 22,5%) foram avaliadas através das suas propriedades básicas, tal como mostra a Figura 6.8 e Figura 6.9.

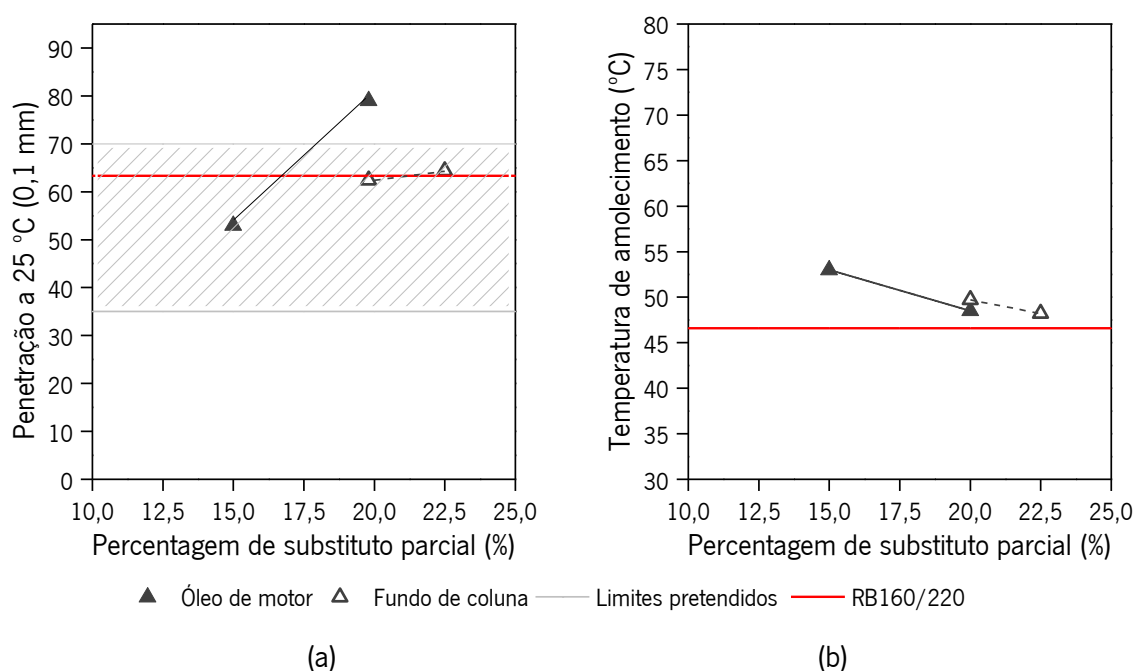


Figura 6.8. Resultados de (a) penetração e (b) temperatura de amolecimento dos betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 20% de CR.

Tal como aconteceu no polímero HDPE, os valores de penetração dos betumes das misturas recicladas modificados com CR e óleo de motor usado aumentam significativamente com o aumento da quantidade de óleo de motor usado. No caso dos betumes das misturas recicladas modificados com CR e fundo de coluna o aumento do valor de penetração é pouco significativo. Assim, deve limitar-se a quantidade de óleo de motor aplicado nestes betumes, podendo utilizar-se maiores quantidades de fundo de coluna.

Relativamente às temperaturas de amolecimento, todos os betumes das misturas recicladas modificados com CR apresentam uma temperatura de amolecimento superior à do betume das misturas recicladas de controlo, em especial ao utilizar menor quantidade de óleo de motor ou fundo de coluna. A resistência à deformação permanente destes betumes deverá ser elevada devido ao uso de 20% de CR.

Deste modo, os betumes das misturas recicladas modificados com CR que apresentam uma penetração compreendida entre 35 e 70×0,1 mm e maximizam o uso de resíduos (critérios de seleção) são o betume RBO15R20 (betume das misturas recicladas modificado com 15% de óleo de motor usado e 20% de CR) e o betume RBF22,5R20 (betume das misturas recicladas modificado com 22,5% de fundo de coluna e 20% de CR). Ao utilizar percentagens ligeiramente superiores de ambos os substitutos parciais seria possível cumprir o intervalo de penetração definido neste trabalho, mas para valores muito próximos desses limites. Assim, foram selecionados estes betumes para evitar problemas de desempenho posteriores.

No que concerne aos resultados de viscosidade dinâmica (Figura 6.9), verifica-se que os betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado e borracha apresentam viscosidades semelhantes, mesmo quando se aumenta a quantidade de substituto parcial.

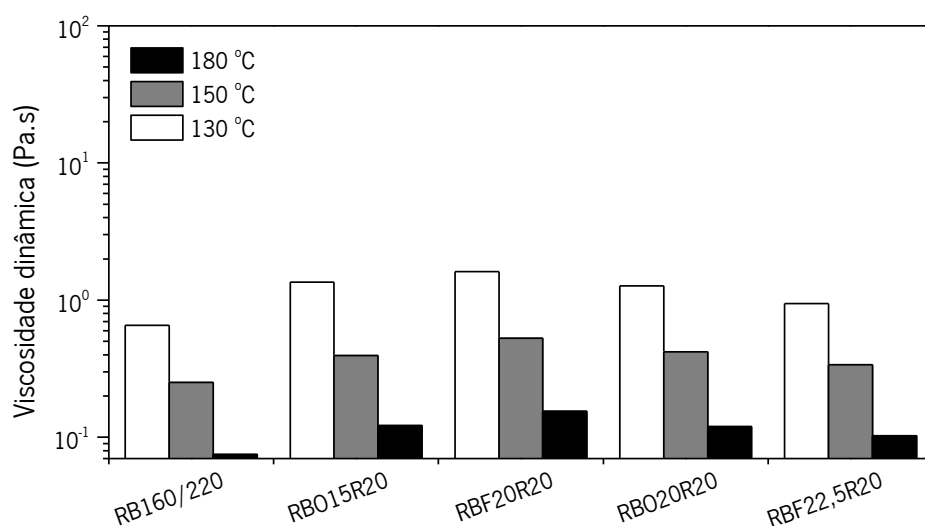


Figura 6.9. Viscosidade dinâmica dos betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado ou fundo de coluna e 20% de CR.

No entanto, nos betumes das misturas recicladas modificados com fundo de coluna e CR ocorre uma redução da viscosidade dinâmica do betume em toda a gama de temperaturas quando se aumenta a

quantidade de fundo de coluna. Este resultado pode estar relacionado com o facto de se utilizarem elevadas percentagens de fundo de coluna (20% e 22,5%), o que terá uma influência mais significativa no comportamento do betume das misturas recicladas nesta gama de temperaturas mais elevada. Importa ainda salientar que todos os betumes das misturas recicladas modificados com borracha apresentam valores de viscosidade dinâmica superiores aos do betume da mistura reciclada de controlo.

Com base nos resultados de viscosidade, verifica-se que a temperatura de produção dos betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado e borracha deve ser 170 °C, e a sua temperatura de compactação deve ser 135 °C. No entanto, ao utilizar fundo de coluna a temperatura de produção deve ser igual ou superior a 160 °C e a temperatura de compactação deve ser 135 °C.

Resumidamente, os betumes das misturas recicladas modificados com resíduos cujas propriedades básicas cumprem os dois requisitos definidos neste trabalho (valores de penetração e maximização de resíduos) são os seguintes: betumes das misturas recicladas modificados com 6% de HDPE e 15% de óleo de motor usado (RBO15H6) ou 17,5% de fundo de coluna (RBF17,5H6), betumes das misturas recicladas modificados com 5% de SBS e 15% de óleo de motor usado (RBO15S5) ou 17,5% de fundo de coluna (RBF17,5S5) e ainda os betumes das misturas recicladas modificados com 15% de óleo de motor usado (RBO15R20) ou 22,5% de fundo de coluna (RBF22,5R20). Estes betumes das misturas recicladas são os mais promissores e, como tal, serão caracterizados através de ensaios mais avançados, e também serão comparados com o betume das misturas recicladas de controlo (RB160/220).

6.5. Propriedades dos betumes das misturas recicladas modificados com resíduos que resultaram do processo de seleção

Os betumes das misturas recicladas modificados com resíduos que foram selecionados anteriormente serão caracterizados ao nível das suas propriedades reológicas, térmicas e de resistência ao envelhecimento de modo a avaliar de forma mais precisa as suas diferenças de desempenho, bem como a influência do tipo e quantidade de substituto parcial e de polímero utilizado. Para além disso, numa fase inicial será apresentado um quadro resumo com as propriedades básicas dos betumes das misturas recicladas selecionados, de modo a resumir as suas principais características, cuja informação também será importante mais tarde para a produção das misturas recicladas.

6.5.1. Propriedades básicas

As propriedades básicas dos betumes das misturas recicladas que foram selecionados anteriormente são apresentadas no Quadro 6.2 (i.e., o valor de penetração, a temperatura de amolecimento, a resiliência e as temperaturas de produção e compactação resultantes do ensaio de viscosidade).

Quadro 6.2. Resumo das propriedades básicas (penetração, temperatura de amolecimento, resiliência e temperaturas de produção/compactação) dos betumes das misturas recicladas selecionados.

Betumes	Penetração a 25 °C (0,1 mm)	Temperatura de amolecimento (°C)	Resiliência (%)	Temperatura (°C)	
				Produção	Compactação
RB160/220	63	47	3	150	130
RBO15H6	61	52	4	180	135
RBO15S5	50	50	15	180	135
RBO15R20	52	53	22	170	135
RBF17,5H6	66	50	3	180	135
RBF17,5S5	63	50	5	180	135
RBF22,5R20	64	48	14	160	135

Tal como referido anteriormente, neste trabalho definiu-se que a penetração dos betumes das misturas recicladas selecionados deve corresponder à dos betumes tipicamente utilizados na pavimentação rodoviária (B35/50 ou B50/70). Neste caso, os betumes das misturas recicladas selecionados e o betume da mistura reciclada de controlo apresentam propriedades de um betume tipo B50/70 (ou seja, penetrações entre 50×0,1 mm e 70×0,1 mm e temperaturas de amolecimento entre 46 °C e 54 °C). Importa salientar que os betumes das misturas recicladas modificados com fundo de coluna e polímeros exibem valores de penetração mais elevados do que os betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado e polímeros, e além disso utilizam maior quantidade de substituto parcial.

Em relação à temperatura de amolecimento, os vários betumes das misturas recicladas selecionados apresentam valores na ordem dos 50 °C, e por isso correspondem a um betume do tipo B50/70.

Os resultados de resiliência foram similares aos obtidos para os betumes modificados selecionados para produção de misturas SMA sem material fresado, ou seja, os betumes das misturas recicladas modificados com CR apresentam os maiores valores de resiliência, seguindo-se o betume das misturas recicladas modificado com 15% de óleo de motor e 5% de SBS. As propriedades elásticas deste tipo de

polímeros (CR e SBS) conferem as capacidades resilientes a esses betumes. Pode ainda verificar-se que a utilização de maiores quantidades de fundo de coluna por comparação com o óleo de motor usado (para o mesmo tipo de polímero) diminui a capacidade resiliente dos betumes das misturas recicladas. Por sua vez, os betumes das misturas recicladas modificados com HDPE e o betume da mistura reciclada de controlo não apresentam capacidade resiliente, tal como seria de esperar.

No que concerne às temperaturas de produção, os betumes das misturas recicladas modificados com resíduos apresentam temperaturas superiores às do betume da mistura reciclada de controlo. No entanto, os betumes das misturas recicladas modificados com borracha exibem temperaturas de produção inferiores às dos restantes betumes desenvolvidos, sendo que para o betume com maior percentagem de substituto parcial (22,5% de fundo de coluna) esse valor diminui 20 °C. Apesar da elevada percentagem de borracha utilizada neste tipo de betume, que à partida aumentaria a viscosidade dinâmica do betume das misturas recicladas correspondente, as temperaturas de produção e compactação reduziram. Neste caso, apesar do betume modificado com CR possuir uma viscosidade elevada, após ser adicionado ao betume envelhecido para obter o betume da mistura reciclada, vai existir uma menor percentagem de borracha no ligante final, o que contribui para a redução de viscosidade. Como a borracha é de difícil dispersão comparativamente aos restantes polímeros (HDPE e SBS), funcionando mais como filler, os substitutos parciais do betume modificado poderão diminuir de forma mais eficaz a viscosidade do betume envelhecido, e também do betume final da mistura reciclada.

Em seguida apresentam-se outras propriedades dos betumes das misturas recicladas, as quais permitem conhecer com mais pormenor o desempenho destes novos ligantes desenvolvidos.

6.5.2. Propriedades reológicas

As propriedades reológicas (obtidas de acordo com a norma EN 14770), nomeadamente as curvas mestras dos módulos complexos e ângulos de fase dos betumes das misturas recicladas modificados com resíduos e do betume da mistura reciclada de controlo, para uma temperatura de referência de 60 °C, podem ser observadas na Figura 6.10.

Os betumes das misturas recicladas modificados com resíduos exibem curvas mestras com uma configuração semelhante ao betume da mistura reciclada de controlo (RB160/220), sugerindo desse modo um comportamento reológico similar. Para além disso, comparativamente ao betume da mistura

reciclada de controlo (RB160/220), os betumes das misturas recicladas modificados com resíduos apresentam módulos complexos superiores, com a exceção dos betumes das misturas recicladas modificados com borracha, que têm módulos complexos inferiores.

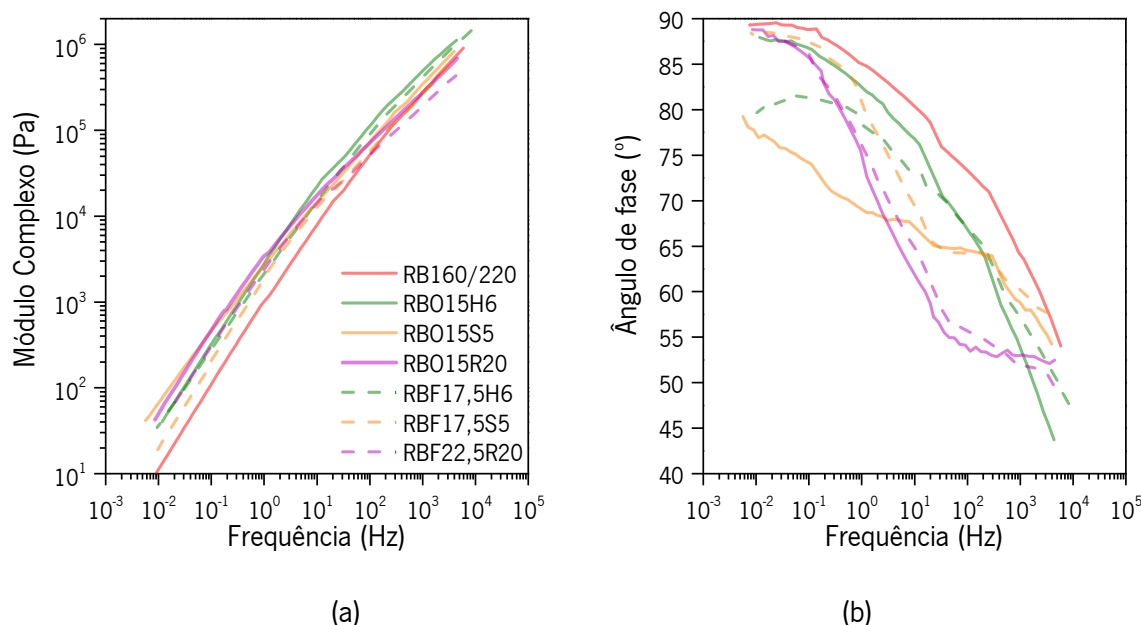


Figura 6.10. Curvas mestras ($T_{ref} = -60\text{ °C}$) do (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase dos betumes das misturas recicladas.

Tal como aconteceu nos betumes modificados com resíduos das misturas sem material fresado, os betumes das misturas recicladas modificados com resíduos também apresentam elevados valores de módulo complexo a baixas frequências (elevadas temperaturas) e módulos complexos semelhantes ao betume de controlo (RB160/220) a elevadas frequências (baixas temperaturas), indicando uma menor suscetibilidade térmica das soluções com betumes modificados com resíduos. Como tal, este resultado poderá indicar uma adequada flexibilidade desses betumes a temperaturas de serviço mais baixas e, ao mesmo tempo, uma maior resistência à deformação permanente a temperaturas mais elevadas. Assim, a gama de temperaturas de serviço dos betumes das misturas recicladas modificados com resíduos é superior à do betume da mistura reciclada de controlo, tendo por isso um melhor desempenho.

No que diz respeito à análise das curvas mestras dos ângulos de fase pode constatar-se que, para toda a gama de temperaturas/frequências estudadas, os betumes das misturas recicladas com resíduos apresentam valores de ângulos de fase menores do que o betume da mistura reciclada de controlo. A configuração das curvas mestras dos betumes das misturas recicladas modificados com SBS ou CR

apresentam configurações diferentes das restantes curvas, devido às propriedades elastómeras desses polímeros, que têm tendência a reduzir a componente viscosa do betume. Neste caso, apesar dos betumes modificados poderem ter reduzido o seu efeito ao serem adicionados ao betume envelhecido para produção dos betumes das misturas recicladas, confirma-se através dos resultados anteriores a manutenção de um bom desempenho reológico dos mesmos.

Com base nos resultados dos ensaios reológicos procedeu-se ao cálculo das temperaturas mais elevadas do grau PG do betume da mistura reciclada de controlo e dos betumes das misturas recicladas modificados com resíduos, cujos valores são apresentados no Quadro 6.3.

Quadro 6.3. Temperatura mais elevada do grau PG dos betumes das misturas recicladas.

Betumes	Temperatura máxima do grau PG
RB160/220	64
RBO15H6	70
RBO15S5	70
RBO15R20	70
RBF17,5H6	70
RBF17,5S5	64
RBF22,5R20	70

Os betumes das misturas recicladas modificados com resíduos apresentam temperaturas mais elevadas do grau PG superiores ao betume da mistura reciclada de controlo, exceto o betume da mistura reciclada modificado com 17,5% de fundo de coluna e 5% de SBS (RBF17,5S5) que apresenta um valor igual. Importa ainda referir que estes betumes apresentam temperaturas mais elevadas do grau PG inferiores aos betumes modificados para produção de misturas betuminosas sem material fresado, pois o efeito dos polímeros nestes betumes das misturas recicladas torna-se menos notório devido à adição do betume envelhecido do material fresado (reduzindo os graus PG). Contudo, estes betumes das misturas recicladas modificados com resíduos exibem uma temperatura mais elevada do grau PG similar ao betume modificado comercial PMB45/80 usado como betume de controlo no Capítulo 4.

Tendo em conta que quanto maior for a temperatura mais elevada do grau PG melhor poderá ser o desempenho à deformação permanente dos betumes, então os betumes das misturas recicladas modificados com resíduos deverão apresentar uma maior resistência à deformação permanente do que

o betume da mistura reciclada de controlo (RB160/220), exceto o betume RBF17,5S5 (como já foi referido).

O ensaio de fluência e relaxamento (norma AASHTO TP 70-11) permite estimar o desempenho à deformação permanente dos betumes em estudo, através do parâmetro de deformação não recuperada (J_{nr}), como complemento à caracterização reológica dos betumes. A Figura 6.11 apresenta a variação do parâmetro de deformação não recuperada dos betumes das misturas recicladas com o aumento da tensão aplicada.

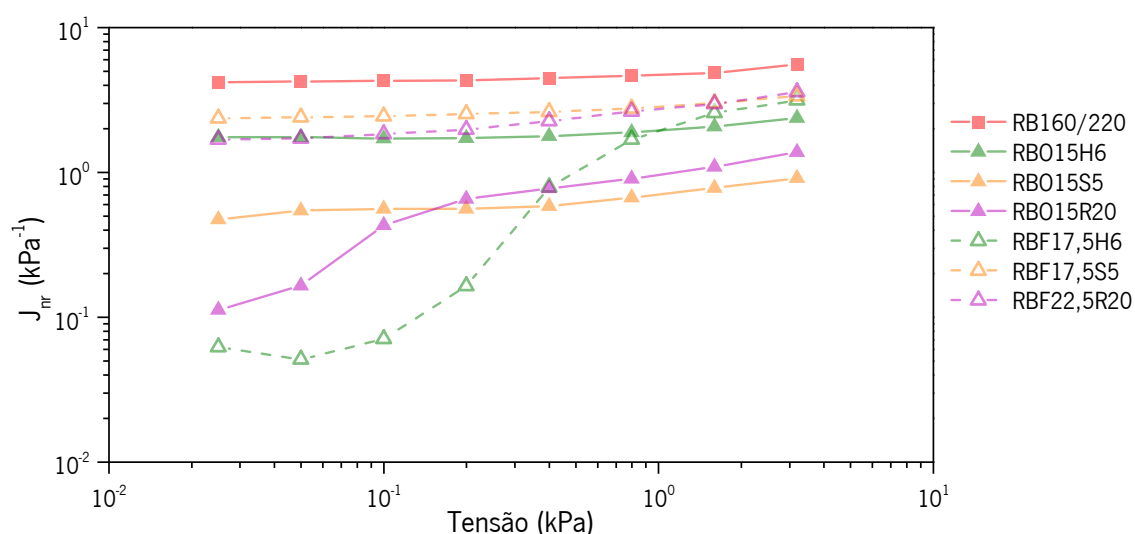


Figura 6.11. Parâmetro de deformação não recuperada (J_{nr}) dos betumes das misturas recicladas.

Quanto menor é o valor do parâmetro de deformação não recuperada, maior é a resistência à deformação permanente de um dado betume. Assim, pode verificar-se que os betumes das misturas recicladas com resíduos apresentam menores valores do parâmetro de deformação não recuperada comparativamente ao betume da mistura reciclada de controlo (RB160/220). Para além disso, pode ainda constatar-se que o betume das misturas recicladas com 17,5% de fundo de coluna e 5% de SBS é aquele que apresenta valores de J_{nr} mais elevados e mais próximos do betume da mistura reciclada de controlo. Estes resultados confirmam a análise anterior efetuada às temperaturas mais elevadas do grau PG dos diferentes betumes.

Importa ainda referir que os vários betumes das misturas recicladas modificados com óleo de motor usado, bem como o betume da mistura reciclada modificado com 17,5% de fundo de coluna e 6% de HDPE, apresentam os menores valores do parâmetro de deformação não recuperada, e por isso devem

apresentar um melhor desempenho à deformação permanente. Ainda é possível notar que os betumes RBO15R20 e RBF17,5H6 apresentam-se como os betumes mais suscetíveis ao aumento da tensão aplicada no ensaio (curvas mais inclinadas, em especial para tensões mais baixas).

Em resumo, após caracterização reológica poderá prever-se que os betumes das misturas recicladas modificados com resíduos deverão, de forma geral, apresentar uma elevada resistência à deformação permanente, que se verificou ser superior à do betume da mistura reciclada de controlo RB160/220.

6.5.3. Resistência ao envelhecimento

Os resultados do ensaio de resistência ao envelhecimento dos betumes das misturas recicladas, com base no ensaio RTFOT (de acordo com a norma EN 12607), podem ser visualizados na Figura 6.12. Como os betumes das misturas recicladas em análise apresentam características básicas típicas de um betume B50/70, optou-se por comparar a resistência ao envelhecimento dos mesmos com este betume convencional, tendo por base a norma EN 12591. Assim, verifica-se que um betume do tipo B50/70 deve apresentar uma penetração conservada igual ou superior a 50%, um aumento da temperatura de amolecimento igual ou inferior a 9 °C e uma variação de massa igual ou inferior a 0,5%.

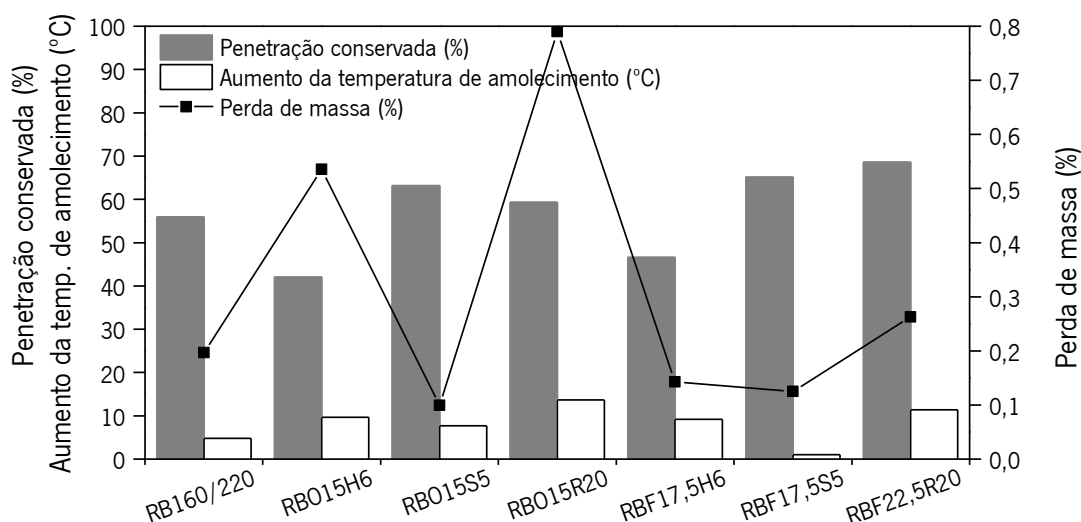


Figura 6.12. Resultados de envelhecimento (penetração conservada, aumento da temperatura de amolecimento e perda de massa) dos betumes das misturas recicladas.

Deste modo, pode verificar-se que o betume da mistura reciclada de controlo (RB160/220), bem como os betumes das misturas recicladas modificados com SBS cumprem a totalidade dos limites requeridos. No caso dos betumes das misturas recicladas modificados com HDPE, estes não verificam o limite mínimo

para a penetração conservada e, no caso do betume das misturas recicladas RBO15H6, o limite do aumento da temperatura de amolecimento também não é atingido. Por sua vez, os betumes das misturas recicladas modificados com borracha em geral não cumprem o limite para o aumento da temperatura de amolecimento e de perda de massa.

Quando se comparam os betumes das misturas recicladas modificados com resíduos produzidos com fundo de coluna ou óleo de motor usado, pode constatar-se que os primeiros apresentam menores perdas de massa. Assim, embora incorporem maiores quantidades de substitutos parciais, estes betumes com fundo de coluna apresentam uma maior resistência ao envelhecimento.

No caso da penetração conservada, o tipo de polímero usado poderá ter influência na conservação da rigidez do betume após o processo de envelhecimento. Isto porque os betumes das misturas recicladas modificados com SBS ou CR (elastómeros) apresentam os valores mais altos de penetração conservada, em especial quando aplicados em conjunto com fundo de coluna. Importa ainda salientar que a penetração conservada foi superior nos betumes modificados com resíduos em estudo no Capítulo 4, comparativamente aos betumes das misturas recicladas, o que poderá dever-se à maior utilização de substitutos de betume neste caso, ou ao facto da adição ao betume envelhecido do material fresado não afetar de forma positiva a resistência ao envelhecimento do betume final.

O aumento da temperatura de amolecimento é mais evidente nos betumes das misturas recicladas modificados com polímeros e óleo de motor usado (confirmando a menor resistência ao envelhecimento deste material por comparação com o fundo de coluna). No caso dos betumes das misturas recicladas modificados com borracha o aumento é muito superior ao limite imposto (9 °C) e, consequentemente aos restantes betumes das misturas recicladas em análise.

Em seguida, para além da avaliação do envelhecimento através do ensaio de RTFOT, foi realizada uma análise aos índices estruturais de carbonilo e sulfóxido (análise FTIR) que, de acordo com a literatura, também permitem avaliar o envelhecimento químico do betume. Na Figura 6.13 e a Figura 6.14 é possível observar os índices de carbonilo e sulfóxido (calculados através da Equação 4.1 e Equação 4.2), respetivamente, antes e após o ensaio RTFOT dos betumes das misturas recicladas, bem como os índices do betume envelhecido do material fresado.

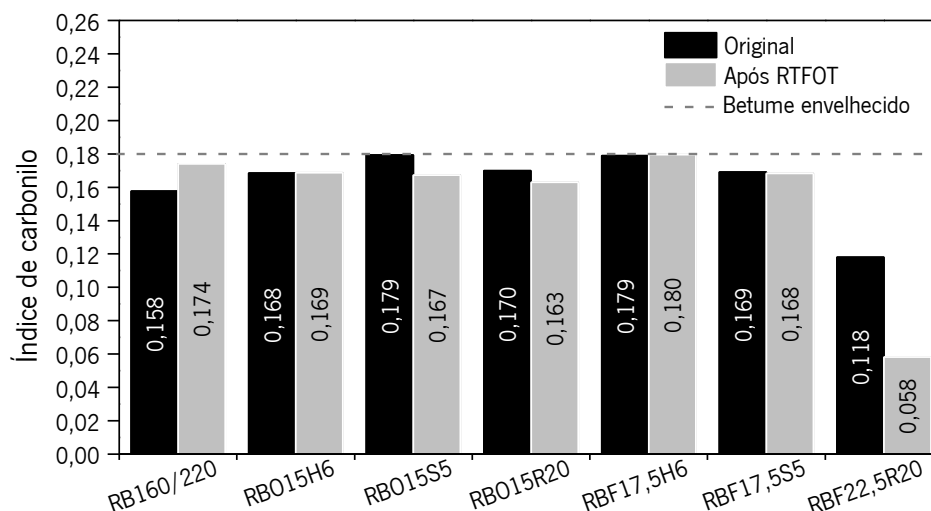


Figura 6.13. Índice de carbonilo dos betumes das misturas recicladas antes e após RTFOT.

O índice de carbonilo do betume da mistura reciclada de controlo (RB160/220) aumentou após o envelhecimento provocado pelo ensaio de RTFOT. No entanto, os betumes das misturas recicladas modificados com resíduos apresentam índices de carbonilo praticamente iguais ou ligeiramente mais baixos após RTFOT, indicando que a introdução destes betumes modificados com resíduos no betume envelhecido retarda o processo de oxidação.

Importa ainda salientar que todos os betumes das misturas recicladas analisados exibem índices de carbonilo inferiores ao do betume envelhecido contido no material fresado, antes e após o ensaio de RTFOT. Tal facto poderá indicar que a utilização dos betumes modificados com resíduos ou do betume convencional de elevada penetração (B160/220) para produção de misturas recicladas consegue reduzir o envelhecimento do betume do material fresado, regenerando-o. Nestes betumes das misturas recicladas não é tão evidente qual o substituto parcial que proporciona uma maior redução dos índices de carbonilo (e correspondente envelhecimento). No entanto, verifica-se que o betume das misturas recicladas modificado com 22,5% de fundo de coluna (maior percentagem deste material) e 20% de CR é aquele que apresenta os menores índices de carbonilo e, como tal, maior capacidade regeneradora.

O índice de sulfóxido dos betumes em análise nesta fase (Figura 6.14) apresenta uma redução após o processo de envelhecimento RTFOT, apenas com exceção do betume RB015S5 onde o índice aumentou ligeiramente. O mesmo tipo de tendência foi observado nos betumes modificados com resíduos e de controlo usados nas misturas sem material fresado. Além disso, só o betume das misturas recicladas RBF22,5R20 apresentou um índice de sulfóxido inferior ao do betume envelhecido do material fresado.

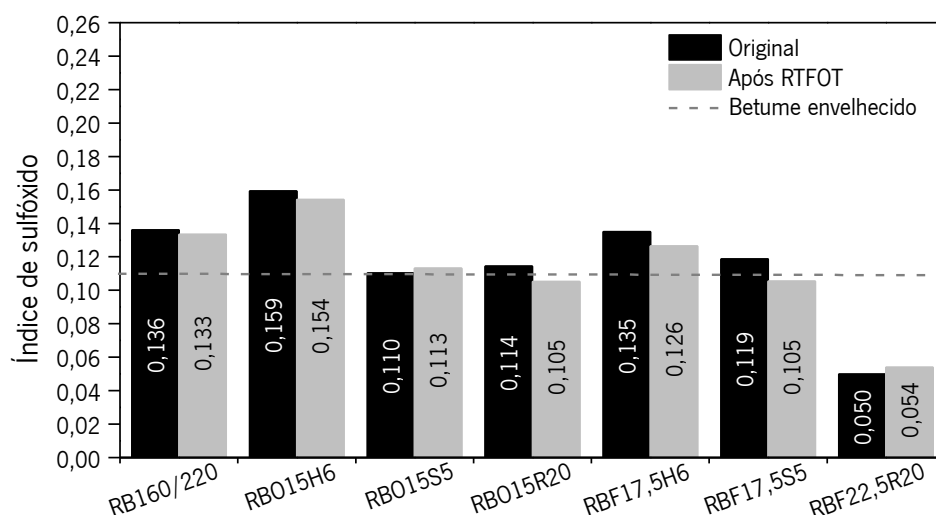


Figura 6.14. Índice de sulfóxido dos betumes das misturas recicladas antes e após RTFOT.

Todavia, a análise deste índice estrutural acaba por não ser considerado aceitável para avaliar o envelhecimento do betume devido ao facto do próprio betume convencional não apresentar envelhecimento após RTFOT. Segundo Yao *et al.* (2013), este comportamento invalida a utilização deste índice estrutural para avaliar o envelhecimento nos betumes.

Em resumo, apesar de alguns dos betumes das misturas recicladas modificados com resíduos não cumprirem a totalidade dos limites exigidos de resistência ao envelhecimento após o ensaio RTFOT, verifica-se através dos índices de carbonilo que esses betumes retardam o processo de oxidação e, consequentemente regeneram o betume envelhecido. Assim, a utilização destes betumes modificados com resíduos pode apresentar vantagens no processo de reciclagem das misturas betuminosas.

6.5.4. Propriedades térmicas

Os betumes das misturas recicladas modificados com resíduos foram caracterizados termicamente através do ensaio de termogravimetria, cujos resultados podem ser visualizados no Quadro 6.4.

Da análise dos resultados térmicos é possível verificar que os betumes das misturas recicladas modificados com SBS e HDPE são termicamente mais estáveis que o betume da mistura reciclada de controlo (RB160/220), pois o início da perda de massa ocorre a temperaturas superiores. Por sua vez, os betumes das misturas recicladas modificados com borracha são menos estáveis termicamente, pois as suas temperaturas de início de perda de massa (203°C e 218°C) são inferiores à do betume da

mistura reciclada de controlo (237 °C). Contudo, estas temperaturas são claramente superiores à temperatura de produção dos betumes e das misturas recicladas, não comprometendo a sua utilização.

Quadro 6.4. Resultados do ensaio de termogravimetria dos betumes das misturas recicladas.

Betumes	T _{onset} (°C)	T _{max} (°C)
RB160/220	237	450
RBO15H6	237	451
RBO15S5	240	450
RBO15R20	203	441
RBF17,5H6	253	453
RBF17,5S5	246	450
RBF22,5R20	218	440

Para o mesmo polímero em análise, importa ainda salientar que os betumes das misturas recicladas modificados com fundo de coluna são mais estáveis termicamente do que com óleo de motor usado. Apesar da elevada quantidade de fundo de coluna utilizada, que poderia aumentar a componente volátil e, consequentemente, a perda de massa, a estabilidade térmica não ficou comprometida.

No que concerne às temperaturas correspondentes às perdas máximas de massa, estas são muito semelhantes entre betumes das misturas recicladas modificados com o mesmo tipo de polímero. Além disso, os betumes das misturas recicladas modificados com SBS e HDPE exibem temperaturas de perda máxima de massa iguais ou ligeiramente superiores à do betume de controlo, o que não acontece com os betumes das misturas recicladas modificados com borracha (cuja diferença é de cerca de 10 °C). A baixa estabilidade térmica dos betumes das misturas recicladas modificados com borracha confirma os resultados térmicos obtidos anteriormente (Capítulo 4) e os resultados do ensaio de RTFOT, onde esses betumes apresentam maiores perdas de massa.

Pode ainda concluir-se que os betumes das misturas recicladas modificados com resíduos são termicamente mais estáveis do que os betumes modificados com resíduos correspondentes utilizados nas misturas betuminosas sem material fresado. A presença de betume envelhecido poderá contribuir para uma maior estabilidade térmica, dado que os compostos voláteis do betume diminuem devido ao processo de envelhecimento.

7. CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS RECICLADAS COM BETUMES MODIFICADOS COM RESÍDUOS

7.1. Introdução

Após seleção dos betumes modificados com resíduos a utilizar na produção das misturas recicladas e caracterização avançada dos betumes dessas misturas recicladas, nesta fase do trabalho procedeu-se à produção e caracterização de misturas SMA recicladas com esses betumes.

Nesse sentido, sete misturas recicladas do tipo SMA 14 foram produzidas com os betumes selecionados (um betume convencional de controlo, um betume modificado com cada tipo de polímero e óleo de motor e um betume modificado com cada tipo de polímero e fundo de coluna). A nomenclatura adotada para identificação dessas sete misturas SMA recicladas foi a seguinte:

- SMA-RB160/220+F (com betume convencional B160/220 + 0,3% de fibras);
- SMA-RB015H6 (com betume modificado com 15% de óleo de motor e 6% de HDPE);
- SMA-RB015S5 (com betume modificado com 15% de óleo de motor e 5% de SBS);
- SMA-RB015R20 (com betume modificado com 15% de óleo de motor e 20% de CR);
- SMA-RBF17,5H6 (com betume modificado com 17,5% de fundo de coluna e 6% de HDPE);
- SMA-RBF17,5S5 (com betume modificado com 17,5% de fundo de coluna e 5% de SBS); e,
- SMA-RBF22,5R20 (com betume modificado com 22,5% de óleo de motor e 20% de CR).

O processo de produção destas misturas SMA recicladas, bem como a sua composição, foram descritas no Capítulo 6, ao apresentar a sua formulação. Tal como mencionado nesse capítulo, a percentagem de betume utilizada nas misturas SMA recicladas foi de 5,8% e as temperaturas de produção e compactação das diferentes misturas recicladas foram as indicadas no Quadro 6.2 (em função do betume utilizado).

Importa salientar que se adicionou 0,3% de fibras à mistura SMA reciclada de controlo (com betume B160/220) de modo a reduzir o escorrimento de betume que poderia ocorrer durante o seu transporte e compactação em obra, tal como se procedeu no Capítulo 5 para a mistura SMA de controlo sem material fresado e com betume B35/50. Apenas se utilizaram as fibras na mistura de controlo, pois a utilização de polímeros nos betumes modificados com resíduos limita muito os eventuais problemas de escorrimento de betume, que também são minimizados pela utilização de material fresado nas misturas SMA recicladas.

Depois de concluída a produção das várias misturas recicladas em estudo, e antes de se proceder à sua compactação, procedeu-se à realização do ensaio de escorrimento do ligante (de acordo com a norma EN 12697-18, método do cesto), para salvaguardar que todas as misturas SMA recicladas cumprem os limites requeridos de escorrimento do betume, cujo incumprimento poderia implicar problemas de desempenho dessas misturas ao serem aplicadas em obra.

Depois de realizado o ensaio acima mencionado, procedeu-se à compactação de lajes com um cilindro de rastos lisos, a partir das quais foram obtidos provetes das misturas SMA recicladas que foram avaliados mecanicamente, sob diferentes condições de serviço. Nesse sentido, as misturas recicladas foram caracterizadas através de ensaios de sensibilidade à água (de acordo com a norma EN 12697-12), de módulo de rigidez (de acordo com a norma EN 12697-26), de resistência ao fendilhamento por fadiga (de acordo com a norma AASTHO TP 8-94) e de resistência à deformação permanente a 60 °C (de acordo com norma EN 12697-22).

Para além disso, e tendo em conta a análise já efetuada no Capítulo 5 às misturas SMA com betumes modificados com resíduos (mas sem material fresado), também se procedeu à avaliação das características superficiais das misturas SMA recicladas através da análise da resistência ao deslizamento com pêndulo Britânico (norma EN 13036-4) e da macrotextura, nomeadamente a profundidade média do perfil (de acordo com a norma EN13473-1).

7.2. Escorrimento do ligante

Relativamente aos resultados de escorrimento do betume, todas as misturas SMA recicladas em análise apresentam valores muito inferiores ao limite recomendado pela literatura (0,2%) para estas misturas, tal como se pode observar na Figura 7.1.

Também se pode constatar que os valores de escorrimento de betume das misturas SMA recicladas produzidas com betumes modificados com resíduos são superiores ao da mistura reciclada de controlo com fibras (SMA-RB160/220+F). Apesar disso, como todas as misturas recicladas cumpriram os requisitos exigidos, comprova-se mais uma vez que não é necessário utilizar fibras em misturas SMA recicladas com betume modificado com resíduos de modo a evitar o escorrimento do betume, pois essa função é desempenhada pelos polímeros.

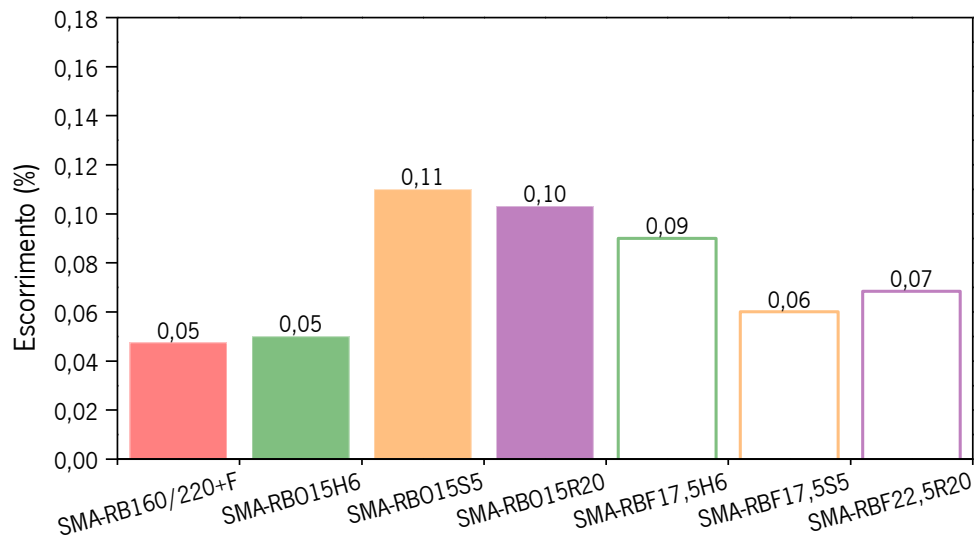


Figura 7.1. Resultados de esgorimento do betume da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.

Importa ainda salientar que as misturas recicladas com fundo de coluna e elastómeros (SBS ou CR) apresentam menores valores de esgorimento de betume do que as misturas correspondentes com óleo de motor usado. Eventualmente, as maiores quantidades de fundo de coluna utilizadas garantem uma melhor dispersão destes polímeros pela mistura reciclada, mesmo após interação entre o betume modificado com resíduos e o betume envelhecido, o que permite reduzir o esgorimento do betume.

Contudo, no caso das misturas recicladas com fundo de coluna e HDPE (plastómero) ocorre o contrário, que poderá ser justificado pelo facto do HDPE se fundir facilmente no betume e a sua dispersão na mistura ser independente da quantidade de substituto de betume utilizado. Nesse caso, ao utilizar maior quantidade de fundo de coluna nas misturas recicladas (por comparação com óleo de motor usado), a viscosidade do betume terá diminuído, o que terá aumentado o esgorimento do betume.

7.3. Características mecânicas das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos

7.3.1. Sensibilidade à água

Dado que as misturas SMA recicladas não apresentaram problemas de esgorimento do betume, iniciou-se a sua caracterização mecânica pela avaliação da sensibilidade à água. Ao considerar o valor mínimo do rácio da resistência à tração indireta (ITSR) que tem vindo a ser recomendado em Portugal

(80%), e que é referido em diferentes estudos (Asphalt Institute, 2001, Brown *et al.*, 2009, Roberts *et al.*, 1996), foi possível verificar que todas as misturas SMA recicladas em estudo (mistura de controlo e misturas com betumes modificados com resíduos) apresentam valores de ITSR claramente superiores (Quadro 7.1). Assim, todas estas misturas recicladas têm reduzida sensibilidade à ação da água.

Quadro 7.1. Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.

Misturas	Provetes	ITS (kPa)	Deformação (mm)	Volume de vazios (%)	ITSR (%)
SMA-RB160/220+F	secos	1971	3,54	3,2	92
	imersos	1819	3,76		
SMA-RB015H6	secos	1506	3,48	3,2	95
	imersos	1436	3,50		
SMA-RB015S5	secos	1463	2,33	4,6	101
	imersos	1476	2,33		
SMA-RB015R20	secos	1246	2,05	5,3	98
	imersos	1216	2,20		
SMA-RBF17,5H6	secos	1310	2,41	5,1	85
	imersos	1109	2,63		
SMA-RBF17,5S5	secos	1381	2,45	4,1	93
	imersos	1286	2,90		
SMA-RBF22,5R20	secos	854	2,29	6,8	90
	imersos	771	2,43		

As misturas SMA recicladas que foram produzidas com betumes modificados com óleo de motor e polímeros, nomeadamente as misturas SMA-RB015H6, SMA-RB015S5 e SMA-RB015R20, exibem os valores de ITSR mais elevados, respetivamente de 95%, 101% e 98%. Esses valores também são superiores ao valor obtido para a mistura reciclada de controlo SMA-RB160/220+F (92%).

Por sua vez, as misturas SMA recicladas produzidas com betumes modificados com fundo de coluna e polímeros exibem valores de ITSR ligeiramente mais baixos, que já são inferiores ao da mistura reciclada de controlo (com exceção da mistura SMA-RBF17,5S5). Assim, a introdução de maiores quantidades de fundo de coluna reduz ligeiramente a resistência à água dessas misturas recicladas por comparação com a utilização de óleo de motor usado, mas sem comprometer o limite estipulado para esta propriedade.

Em seguida verificou-se que os valores de resistência à tração indireta (ITS) dos provetes secos das misturas recicladas com betumes modificados com óleo de motor e polímeros são inferiores, em cerca de 29%, aos da mistura reciclada de controlo. Tal comportamento pode dever-se à utilização do óleo de motor usado, que torna a mistura menos rígida, tal como se verificou anteriormente (Capítulo 5) para as misturas correspondentes sem material fresado. Porém, a redução dos valores de ITS nestas misturas recicladas é muito inferior à determinada no Capítulo 5.

De facto, a presença de betume envelhecido e a introdução de uma menor quantidade de betume com óleo de motor e polímeros na mistura reciclada, podem justificar a menor redução dos valores de ITS comparativamente às misturas SMA sem material fresado. As misturas SMA recicladas cujo betume foi modificado com fundo de coluna e polímeros sofreram uma redução dos valores de ITS de aproximadamente 40% em comparação à mistura reciclada de controlo, devido ao aumento da quantidade de substituto parcial presente nestas misturas. No entanto, a redução de ITS verificada nas misturas SMA correspondentes sem material fresado (Capítulo 5) foi muito superior, pelas razões apresentadas no parágrafo anterior.

Apesar da resistência à tração indireta das misturas SMA recicladas ser inferior quando se utilizam betumes modificados com resíduos, também foi possível constatar que essas misturas apresentam valores de deformação inferiores aos da mistura reciclada de controlo.

O volume de vazios foi determinado tendo em conta as características volumétricas de cada mistura, nomeadamente a baridade aparente (com valores entre 2288 e 2360 kg/m³) e a baridade máxima teórica (compreendida entre 2421 e 2455 kg/m³). No que diz respeito ao volume de vazios, a mistura reciclada de controlo, bem como as misturas SMA recicladas com betumes modificados com resíduos, têm volumes de vazios que variam de 3,2% a 6,8%. Assim, verifica-se que apenas uma dessas misturas (SMA-RBF22,5R20, com borracha e fundo de coluna) não cumpre o intervalo de valores recomendados para o volume de vazios (3% a 6%, referido na literatura), o que em parte justifica os menores valores de ITS e ITSR dessa mistura. No entanto, e apesar das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos apresentarem em geral volumes de vazios superiores à mistura reciclada de controlo, a sua durabilidade não fica comprometida, pois têm reduzida sensibilidade à água (ITSR elevados). Em teoria, estes betumes modificados poderão revestir de forma mais eficaz os agregados e o material fresado, com um aumento da adesividade betume/agregado e da coesão do betume, reduzindo assim o dano feito pela água.

Pode assim concluir-se que as misturas recicladas com óleo de motor e polímeros apresentam um melhor desempenho à ação da água do que as misturas recicladas com fundo de coluna e polímeros. Porém, todas as misturas SMA recicladas com betumes modificados com resíduos cumprem os valores requeridos para esta propriedade (ITSR), mesmo com elevadas taxas de reutilização de resíduos.

7.3.2. Módulo de rigidez

Da análise das curvas mestras dos módulos de rigidez e dos ângulos de fase das diferentes misturas SMA recicladas (Figura 7.2), para uma temperatura de referência de 20 °C, pode constatar-se que a mistura reciclada com betume modificado com fundo de coluna e CR (SMA-RBF22,5R20) é a menos influenciada pela variação da temperatura (menor declive da curva mestra), enquanto a mistura reciclada com fundo de coluna e HDPE (SMA-RBF17,5H6) é a mais influenciada pelas alterações de temperatura (maior declive da curva mestra).

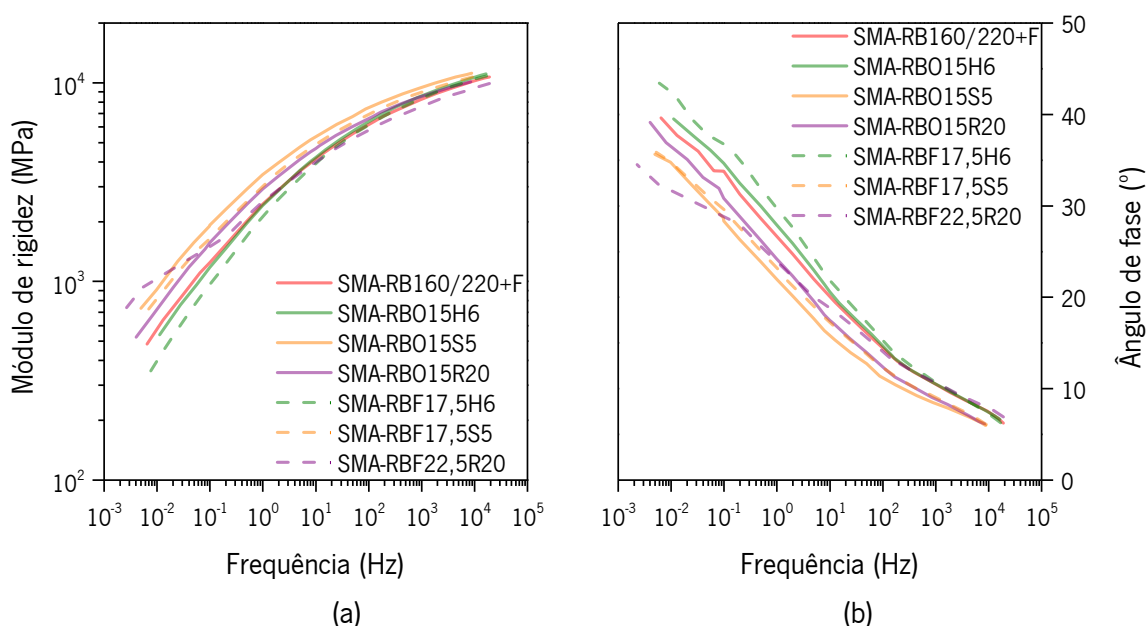


Figura 7.2. Curvas mestras do (a) módulo de rigidez e (b) ângulo de fase ($T_{ref} = 20$ °C) da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.

No primeiro caso, a menor interação da CR com o betume/fundo de coluna poderá ter contribuído para que a borracha funcione como um filer elástico que tornou a mistura menos suscetível às variações de temperatura. No segundo caso, a maior influência da temperatura poderá estar relacionada com a elevada quantidade de fundo de coluna adicionada ao plastómero HDPE, que desse modo sofre uma maior redução de módulo para temperaturas elevadas (baixa frequência).

Assim, verifica-se que a mistura SMA reciclada RBF22,5R20 apresenta módulos de rigidez mais baixos e ângulos de fase elevados para frequências mais altas (baixas temperaturas), bem como módulos mais elevados e ângulos de fase mais baixos a menores frequências (elevadas temperaturas), o que demonstra o referido efeito elástico da borracha como filler.

Para baixas temperaturas (elevadas frequências), as restantes misturas recicladas com betumes modificados com resíduos exibem módulos de rigidez similares e ângulos de fase similares ou um pouco superiores comparativamente com os da mistura reciclada de controlo. Para baixas frequências (elevadas temperaturas), as misturas recicladas que utilizam elastómeros (SBS e CR) apresentam módulos de rigidez mais elevados e ângulos de fase mais baixos relativamente à mistura reciclada de controlo, enquanto as misturas recicladas que utilizam plastómeros (HDPE) têm módulos de rigidez similares ou inferiores, assim como ângulos de fase mais altos do que a mistura reciclada de controlo. Ou seja, os elastómeros garantem uma maior resistência à deformação permanente do que os plastómeros.

Assim, caso a utilização de uma destas soluções ocorra numa região com clima moderado a frio (referente a frequências mais elevadas), todas as misturas recicladas poderão ser soluções válidas, com um comportamento semelhante entre si (exceto a mistura RBF22,5R20 anteriormente referida, que tem um menor módulo). Por outro lado, caso a utilização prevista das mesmas soluções aconteça num país com clima quente (referente a frequências mais elevadas), as misturas recicladas que utilizam elastómeros (SBS e CR) vão ser melhores soluções. Assim, ao contrário do que aconteceu nas misturas SMA sem material fresado, as misturas com HDPE são aquelas que exibem módulos mais baixos para temperaturas elevadas. A utilização deste polímero juntamente com o óleo de motor/fundo de coluna nas misturas recicladas pode ter um maior efeito na regeneração do betume envelhecido, mas a menor concentração do HDPE no betume final da mistura reciclada também pode justificar os menores módulos de rigidez encontrados neste caso.

7.3.3. Resistência ao fendilhamento por fadiga

A resistência ao fendilhamento por fadiga é uma característica extremamente importante para avaliar a durabilidade das misturas betuminosas. Assim, tal como se pode observar na Figura 7.3, a mistura reciclada com óleo de motor usado e HDPE (SMA-RBO15H6) apresenta a maior resistência à fadiga, seguindo-se a mistura reciclada com óleo de motor usado e SBS (SMA-RBO15S5), ainda que para extensões mais baixas o desempenho à fadiga das duas misturas seja muito semelhante.

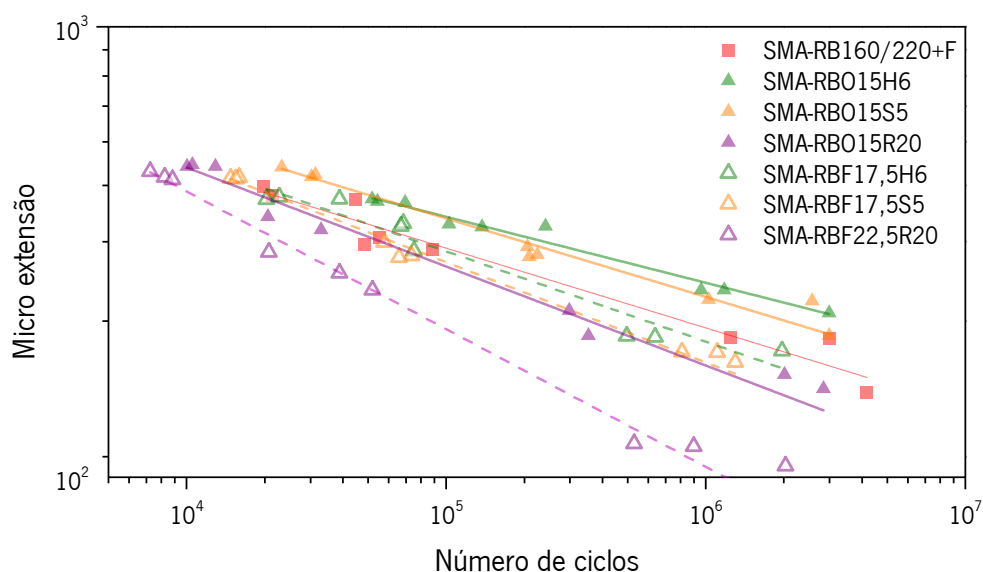


Figura 7.3. Resultados do ensaio de fendilhamento por fadiga em flexão em quatro pontos da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.

A elevada resistência à fadiga da mistura reciclada com SBS resulta das propriedades de recuperação elástica deste polímero, enquanto na mistura reciclada com HDPE (SMA-RB015H6) terá resultado duma maior interação do betume modificado com o betume envelhecido do material fresado, contribuindo para uma maior flexibilidade (menor rigidez) e um melhor desempenho à fadiga.

Pode ainda verificar-se que a mistura reciclada com pior desempenho à fadiga é a mistura com fundo de coluna e borracha (SMA-RBF22,5R20), o que poderá dever-se à reduzida interação entre o betume/fundo de coluna e a borracha de pneus usados. A borracha terá funcionado como um filler que adsorveu parte do betume necessário para a mistura e, consequentemente, a vida à fadiga diminuiu. Assim, apesar de esta mistura reciclada ser menos suscetível à variação de temperatura (devido à presença da borracha), este efeito positivo não implica uma melhoria da resistência ao fendilhamento por fadiga.

As restantes misturas recicladas com betumes modificados com resíduos apresentam um desempenho à fadiga similar ou ligeiramente superior à mistura reciclada de controlo (SMA-RB160/220+F) para níveis de extensão mais altos, mas a situação inverte-se para baixos níveis de extensão mais habituais nos pavimentos rodoviários. Deste modo, é fundamental que se analise em cada situação, e com o devido pormenor, as vantagens ou desvantagens da utilização destes betumes modificados com resíduos em relação à resistência ao fendilhamento por fadiga.

Os parâmetros do ensaio de fadiga, nomeadamente o número de ciclos até à rutura (resistência à fadiga) resultante da aplicação de uma extensão de tração de 100×10^{-6} (N_{100}), bem como a extensão de tração que causa uma resistência à fadiga de 1×10^6 ciclos (ϵ_6) podem ser observados no Quadro 7.2. Devido aos elevados valores obtidos para o coeficiente de determinação (superiores a 0,9), a precisão do cálculo destes parâmetros usando as equações da vida à fadiga, quer da mistura reciclada de controlo, quer das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos, fica assegurada.

Quadro 7.2. Parâmetros obtidos no ensaio de fendilhamento por fadiga da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.

Misturas	Parâmetros da lei de fadiga $\epsilon = a \times N^b$			N_{100} (ciclos)	ϵ_6 (10^{-6})
	a	b	r^2		
SMA-RB160/220+F	2364	-0,173	0,95	8,5E+07	216
SMA-RBO15H6	2090	-0,148	0,97	7,9E+08	269
SMA-RBO15S5	2508	-0,165	0,97	2,9E+08	255
SMA-RBO15R20	3134	-0,205	0,98	2,0E+07	185
SMA-RBO17,5H6	3229	-0,202	0,95	3,0E+07	199
SMA-RBF17,5S5	3437	-0,211	0,99	1,9E+07	186
SMA-RBF22,5R20	5793	-0,284	0,98	1,6E+06	114

Deste modo verifica-se que as misturas recicladas com óleo de motor usado e HDPE (SMA-RBO15H6) ou SBS (SMA-RBO15S5) exibem o melhor desempenho à fadiga uma vez que apresentam uma resistência à fadiga 9 ou 3 vezes superior à mistura reciclada de controlo (RB160/220+F), respetivamente. Para além disso, estas misturas são capazes de suportar, para cada ciclo de carga, uma extensão de tração que é 25% (no caso da mistura SMA-RBO15H6) ou 18% (na mistura reciclada RBO15S5) superior comparativamente à mistura de controlo RB160/220+F.

Por sua vez, confirma-se que a mistura reciclada com fundo de coluna e CR tem o pior desempenho à fadiga, uma vez que exhibe uma vida à fadiga 56 vezes inferior à mistura reciclada de controlo. Como tal, não é uma solução muito vantajosa em situações nas quais seja necessário ter uma boa resistência ao fendilhamento, embora possa ser uma solução vantajosa em regiões quentes, onde o principal problema seja de resistência à deformação permanente (cuja avaliação será realizada na fase seguinte deste trabalho).

As restantes misturas recicladas em análise (SMA-RBF17,5H6, SMA-RB015R20 e SMA-RBF17,5S5) apresentam um comportamento à fadiga muito semelhante (vida à fadiga varia apenas entre 19 e 30 milhões de ciclos, e as micro extensões de tração variam apenas entre 185 e 190), embora as suas vidas à fadiga sejam em média 4 vezes inferiores à mistura SMA reciclada de controlo. Contudo, comparativamente à mistura SMA de controlo sem material fresado (mistura SMA-B35/50+F, que foi apresentada no Capítulo 5), a vida à fadiga destas misturas é superior. Ou seja, pode considerar-se que estas misturas recicladas com betumes modificados com resíduos apresentam um adequado desempenho à fadiga, que é superior ao de uma mistura convencional com betume comercial.

Ao comparar as misturas recicladas com óleo de motor usado ou com fundo de coluna, e contrariamente ao que se verificou nas misturas sem material reciclado, as primeiras apresentaram melhor vida à fadiga quando comparadas com as misturas recicladas com fundo de coluna para o mesmo tipo de polímero. Neste caso, apesar da introdução de maiores quantidades de fundo de coluna, o seu efeito no desempenho à fadiga das misturas recicladas não é tão positivo. No caso da mistura reciclada com fundo de coluna e CR, o seu pior desempenho à fadiga poderá dever-se, tal como mencionado anteriormente, à baixa quantidade de betume efetivo disponível nesta mistura reciclada.

7.3.4. Resistência à deformação permanente

No que diz respeito ao desempenho à deformação permanente, as misturas SMA recicladas com betumes modificados com resíduos mostram um desempenho mais promissor do que a mistura de controlo, excluindo a mistura com óleo de motor e HDPE (SMA-RB015H6) que apresenta a menor resistência à deformação permanente (Figura 7.4). No entanto, o melhor desempenho neste ensaio foi das duas misturas SMA recicladas com betume modificado com borracha.

Assim, confirma-se que o desempenho à fadiga das misturas recicladas deve ser contraposto com a sua resistência à deformação permanente, para avaliar as vantagens de cada mistura em cada caso específico de aplicação em obra.

Quando comparadas com as misturas recicladas com óleo de motor, as misturas recicladas com fundo de coluna exibem em geral uma resistência à deformação permanente mais alta, apesar da maior quantidade de substituto parcial na sua constituição. No entanto, no caso das misturas recicladas com borracha, o comportamento é semelhante ao utilizar óleo de motor usado ou fundo de coluna.

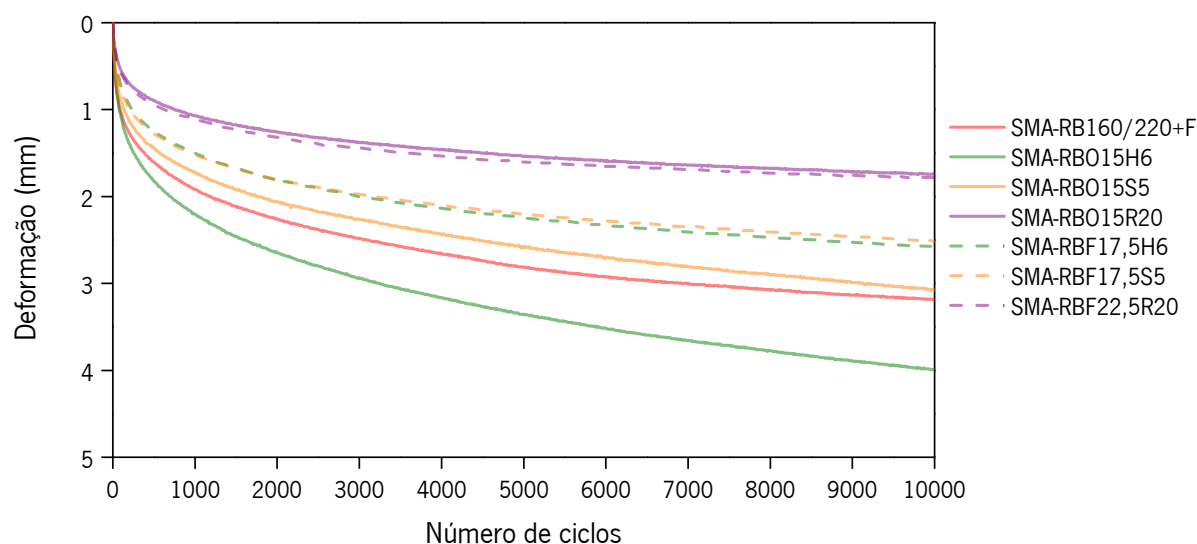


Figura 7.4. Resultados do ensaio de deformação permanente da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.

Como mencionado anteriormente, a representação 3D das amostras das diferentes misturas recicladas após o ensaio de deformação permanente possibilita a visualização do aspeto final das diferentes rodeiras e a comparação entre a profundidade das mesmas. Para as misturas recicladas, apresenta-se como exemplo a representação gráfica 3D das amostras de ensaio das misturas com pior (SMA-RB015H6) e melhor (SMA-RBF22,5R20) desempenho (Figura 7.5).

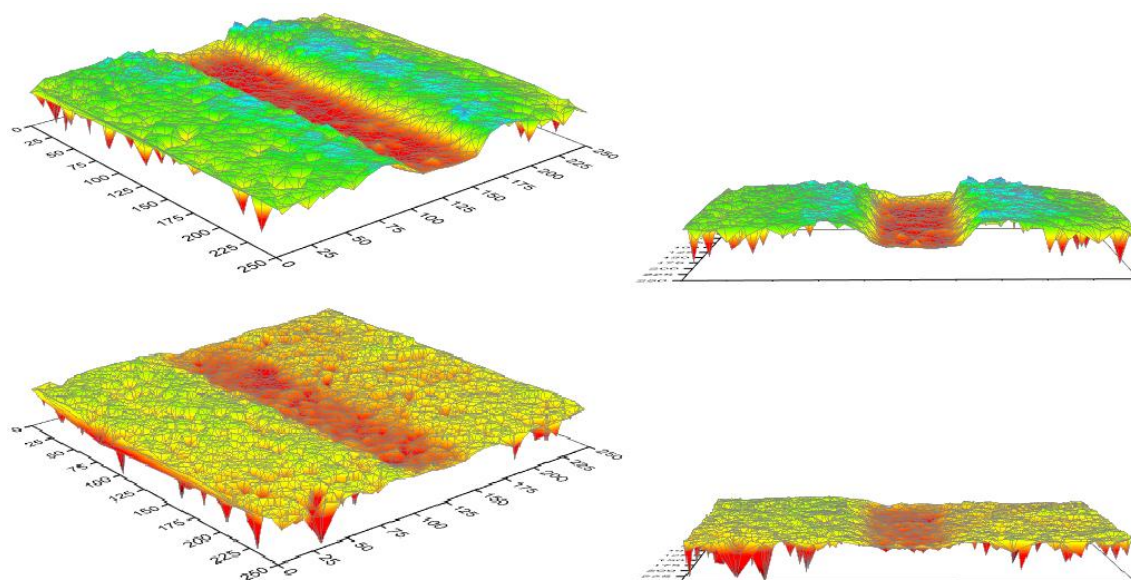


Figura 7.5. Representação 3D das amostras das misturas SMA-RB015H6 e SMA-RBF22,5R20, respetivamente, após ensaio de deformação permanente.

Desse modo, verifica-se visualmente o excelente desempenho à deformação permanente da mistura reciclada com fundo de coluna e borracha. No entanto, constata-se que a mistura reciclada com óleo de motor usado e HDPE exibe uma profundidade da rodeira claramente superior à mistura reciclada com fundo de coluna e borracha.

Em seguida fez-se a análise de parâmetros especificados deste ensaio referidos na norma EN 12697-22 e contemplados no Quadro 7.3, nomeadamente a taxa de deformação (WTS_{AIR}), a percentagem da profundidade da rodeira máxima (PRD_{AIR}) e a profundidade máxima da rodeira (RD_{AIR}).

Quadro 7.3. Parâmetros obtidos no ensaio de deformação permanente da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.

Misturas	WTS_{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	PRD_{AIR} (%)	RD_{AIR} (mm)
SMA-RB160/220+F	0,07	7,81	3,19
SMA-RB015H6	0,13	9,63	4,00
SMA-RB015S5	0,10	7,66	3,08
SMA-RB015R20	0,04	4,34	1,75
SMA-RBF17,5H6	0,07	6,26	2,58
SMA-RBF17,5S5	0,06	5,98	2,51
SMA-RBF22,5R20	0,04	4,36	1,79

Assim, pode constatar-se que apesar da mistura SMA-RBF15H6 exibir o desempenho à deformação permanente menos promissor, tem valores de WTS_{AIR} (0,13 mm/10³ ciclos) e PRD_{AIR} (9,63%) aceitáveis para os trabalhos correntes de pavimentação, e que são similares aos valores de WTS_{AIR} (0,12 mm/10³ ciclos) e PRD_{AIR} (9,97%) da mistura SMA com betume modificado comercial SMA-PMB45/80 (ver Capítulo 5).

Para além disso, importa referir que a mistura reciclada com óleo de motor e borracha exibe o melhor desempenho à deformação permanente, uma vez que apresenta os menores valores de WTS_{AIR} (0,04 mm/10³ ciclos) e PRD_{AIR} (4,34%). Este excelente comportamento pode estar relacionado com a elevada quantidade de CR usado (20%), comparativamente às misturas com os outros polímeros. A mistura reciclada com fundo de coluna e borracha também apresenta um excelente desempenho à deformação permanente, com valores de WTS_{AIR} de 0,04 mm/10³ ciclos e valores de PRD_{AIR} de 4,36%.

Os valores de resistência à deformação permanente da mistura reciclada de controlo com betume convencional e fibras, bem como das misturas recicladas com fundo de coluna e HDPE ou SBS são praticamente equivalentes (os valores de WTS_{AIR} variam apenas entre 0,06 e 0,07 mm/10³ ciclos).

Da análise dos resultados de deformação permanente das misturas recicladas pode concluir-se que a utilização de fundo de coluna conduz a uma resistência à deformação permanente mais elevada. Assim, a resistência à deformação permanente dessas misturas recicladas não fica comprometida apesar da maior quantidade de fundo de coluna utilizado como substituto parcial do betume, sendo superior quando comparada com as misturas recicladas com óleo de motor e com os mesmos polímeros.

Ao comparar os resultados de deformação permanente das misturas SMA recicladas com os resultados do ensaio de fluência e relaxamento dos betumes correspondentes, verifica-se que o ensaio de fluência e relaxamento não consegue refletir integralmente o real desempenho dos betumes modificados com polímeros (particularmente dos que não são elastómeros). De facto, a mistura reciclada SMA-RB015H6 apresentou a menor resistência à deformação permanente no ensaio de pista, mas no ensaio de fluência e relaxamento do betume correspondente verificou-se que o valor do parâmetro de deformação não recuperada não era o mais elevado (o que indicaria a menor resistência à deformação agora observada). No entanto, importa referir que a elevada complexidade das misturas desenvolvidas neste trabalho ajudam a compreender que seja difícil encontrar uma boa correlação entre os resultados dos ensaios aos betumes e às misturas betuminosas.

7.4. Características superficiais das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos

Por último, e tal como nas misturas SMA com betumes modificados com resíduos e sem material fresado, foram avaliadas as características superficiais das misturas SMA recicladas com betumes modificado com resíduos, nomeadamente a macrotextura e a resistência ao deslizamento.

De acordo com os resultados da Figura 7.6, pode verificar-se que as misturas recicladas com betumes modificados com óleo de motor usado e polímeros apresentam valores da profundidade média do perfil (MPD) superiores ao valor típico das misturas SMA (1,0 mm). No entanto, o mesmo não se verifica para a mistura reciclada de controlo, cujo valor de MPD (0,94 mm) é ligeiramente inferior ao valor característico das misturas SMA. Deste modo, constata-se que as misturas recicladas com betumes

modificados com óleo de motor e polímeros garantem maior segurança e conforto aos condutores, pois apresentam valores de MPD superiores a 1,0 mm. O mesmo tipo de comportamento pode ser observado nas misturas recicladas com fundo de coluna e polímeros. Ou seja, as misturas SMA-RBF17,5H6, SMA-RBF17,5S5 e SMA-RBF22,5R20 exibem valores de MPD entre 1,17 e 1,90 mm, que são superiores ao valor tipicamente adotado para misturas do tipo SMA (1,0 mm).

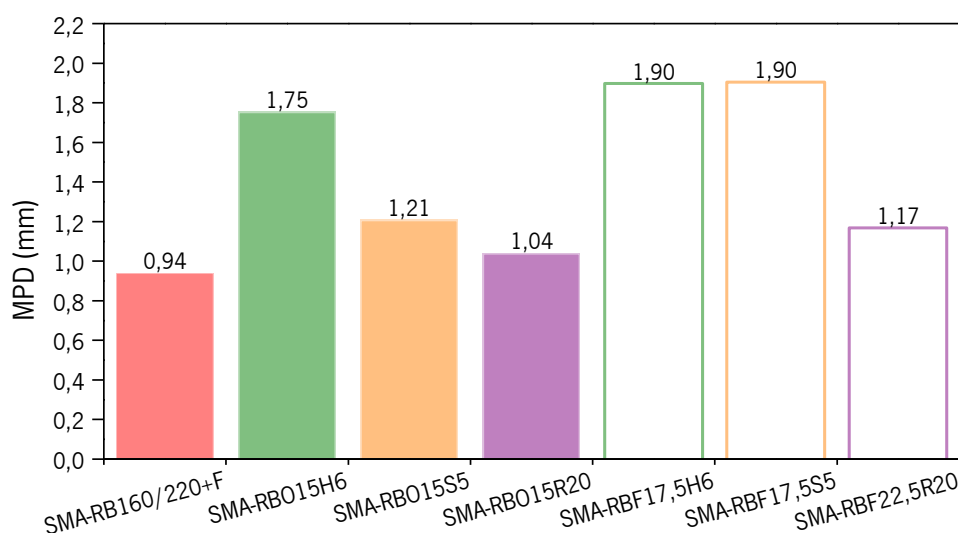


Figura 7.6. Resultados da profundidade média do perfil (MPD) da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.

Quando comparadas entre si, as misturas recicladas com fundo de coluna e polímeros apresentam valores de MPD superiores aos das misturas recicladas com óleo de motor usado e polímeros. O facto dessas misturas recicladas utilizarem maiores quantidades de substituto parcial no betume não afetou a profundidade média do perfil. O mesmo tipo de comportamento foi constatado ao avaliar as misturas SMA com fundo de coluna e polímeros e sem material fresado (Capítulo 5), o que poderá indicar que a utilização de fundo de coluna aumenta a profundidade média do perfil, contribuindo para uma menor aspersão de água pelos veículos e para uma melhor drenagem superficial do pavimento.

Para além disso, pode ainda concluir-se que a utilização de HDPE contribui para o aumento da profundidade média do perfil, ao contrário do que acontece quando se utiliza borracha, quer nas misturas SMA recicladas, quer nas misturas SMA sem material fresado (Capítulo 5). As misturas recicladas com SBS também exibem valores de profundidade média do perfil superiores aos valores de MPD apresentados pelas misturas com borracha.

Em seguida avaliou-se a resistência ao deslizamento das várias misturas com base no ensaio de pêndulo Britânico. De forma a assegurar a segurança necessária para os condutores, a especificação portuguesa (EP, 2014) exige um valor mínimo da resistência ao deslizamento para as misturas aplicadas em camada de desgaste igual a 60 unidades PTV.

No entanto, pode verificar-se na Figura 7.7 que nenhuma das misturas SMA recicladas em estudo, quer com óleo de motor usado e polímeros, quer com fundo de coluna e polímeros, apresenta uma resistência ao deslizamento igual ou superior a 60 unidades PTV.

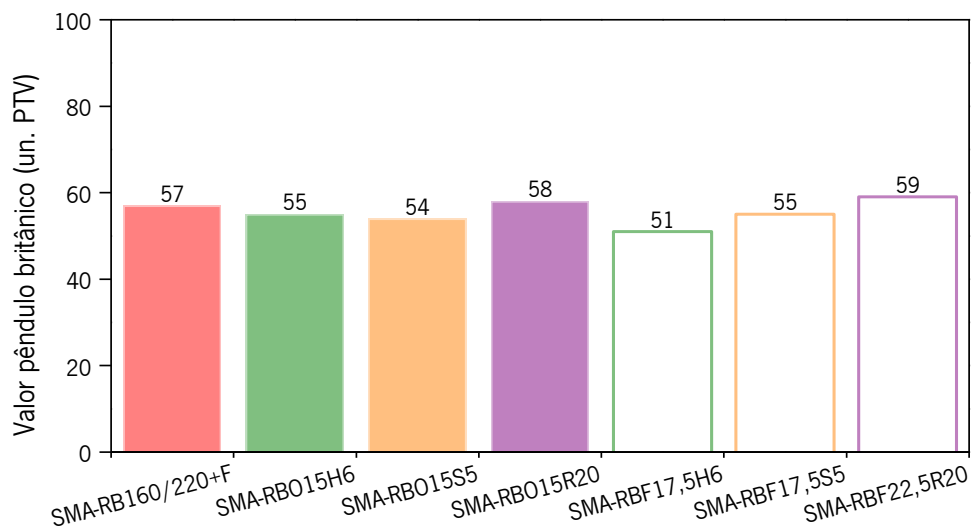


Figura 7.7. Resultados do pêndulo Britânico da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.

Contudo, a mistura SMA reciclada de controlo SMA-RB160/220+F, que não tem na sua constituição óleo de motor, fundo de coluna ou polímeros, também apresenta um valor de PTV inferior ao recomendado. Deste modo, os baixos valores de PTV apresentados poderão estar essencialmente relacionados com a dificuldade em obter uma curva granulométrica mais descontínua neste tipo de misturas SMA recicladas (como consequência da utilização de material fresado) e não tanto com o tipo de betume utilizado.

O incumprimento do requisito de resistência ao deslizamento poderá trazer problemas de segurança aos condutores, embora esta propriedade careça de uma análise mais aprofundada. Isto é, os ensaios de avaliação de atrito são efetuados seis meses a um ano após entrada em serviço do pavimento, uma vez que numa primeira fase a mistura ainda não atingiu o seu máximo valor de atrito devido à película de betume superficial que os pavimentos apresentam após compactação. Além disso, é importante ter em

consideração que estes ensaios foram realizados em lajes produzidas em laboratório, com um cilindro de rastos lisos, sendo importante fazer uma avaliação futura de misturas aplicadas *in situ*. Como tal, estes valores poderão vir a ser mais elevados, atingindo o valor de atrito exigido por lei, caso a sua resistência ao deslizamento fosse avaliada *in situ* e após a fase inicial colocação.

Apesar disso, os valores de PTV das misturas recicladas com betumes modificados com resíduos são muito semelhantes entre si, divergindo apenas 1 a 4 unidades PTV entre misturas com o mesmo tipo de polímero. Deve realçar-se que as misturas recicladas com borracha apresentam os valores de PTV mais elevados (58 e 59 unidades PTV). O mesmo tipo de comportamento foi verificado nas misturas SMA sem material fresado, podendo assim concluir-se que a borracha contribui para o aumento das propriedades antiderrapantes das misturas, independentemente do substituto de betume utilizado (que tem pouca influência nesta propriedade).

8. SUSTENTABILIDADE DAS MISTURAS BETUMINOSAS ESTUDADAS

8.1. Considerações iniciais

A avaliação da sustentabilidade das misturas betuminosas desenvolvidas neste trabalho foi realizada através da análise económica e ambiental das diferentes soluções de pavimentação daí resultantes.

De forma a efetuar uma análise económica das misturas estudadas neste trabalho, com betumes inovadores modificados com resíduos, procedeu-se a uma análise do custo dos betumes modificados e das respetivas misturas. No entanto, para se quantificar o custo global de cada solução foi necessário dimensionar previamente as estruturas de pavimentos “equivalentes” resultantes da utilização das diferentes misturas, o que originou a obtenção de camadas betuminosas com espessuras distintas como consequência da variação do desempenho dos betumes e das misturas selecionadas nos capítulos anteriores.

Durante o estudo laboratorial apenas se avaliou mecanicamente misturas do tipo SMA 14, que apenas se utilizam em camada de desgaste. Assim, para dimensionamento das estruturas de pavimento em análise optou-se por considerar que as misturas a aplicar nas camadas de ligação e base eram ambas do mesmo tipo, ou seja, macadame betuminoso AC 20 bin/base (MB).

8.1.1. Módulos de rigidez utilizados no dimensionamento das estruturas de pavimentos consideradas

Os módulos de rigidez das diferentes misturas utilizadas em camada de desgaste, com os novos betumes modificados com resíduos ou com os betumes de controlo, foram os obtidos nos ensaios laboratoriais apresentados nos capítulos anteriores, para uma temperatura de referência de 20 °C e uma frequência de 8 Hz, de acordo com a norma EN 13108-20.

Por outro lado, os módulos de rigidez das misturas consideradas para camada de ligação e base não foram obtidos por ensaios mecânicos, dado ser inviável a produção e caracterização dessas misturas adicionais em tempo útil. Assim, tendo em consideração que o módulo de rigidez deste tipo de misturas (MB) produzidas com betumes convencionais, do tipo B35/50, tradicionalmente oscila entre 5000 e 6000 MPa, considerou-se de forma conservativa o valor inferior deste intervalo para uma mistura deste tipo produzida sem modificação do betume.

Uma vez que os betumes modificados com resíduos avaliados neste estudo também podem ser utilizados noutro tipo de misturas, para cada estrutura de pavimento em análise considerou-se que todas as misturas betuminosas utilizadas eram produzidas com o mesmo tipo de betume. Essa opção permite distinguir de forma mais evidente a sustentabilidade de cada solução, o que não aconteceria se apenas a camada de desgaste fosse constituída pelas novas misturas em estudo. No entanto, este pressuposto obriga a estimar os módulos de rigidez dos macadames que seriam produzidos com cada um dos betumes modificados em análise.

Nesse sentido, considerou-se como referência a estrutura de pavimento cuja camada de desgaste contém a mistura SMA-B35/50+F, que utiliza um betume não modificado, e à qual correspondem camadas de ligação e base do tipo AC 20 bin/base 35/50 com um módulo de rigidez de 5000 MPa, tal como referido anteriormente. Em seguida, os valores do módulo de rigidez dos restantes macadames, com os diferentes tipos de betume modificado, foram estimados a partir do módulo de rigidez da mistura de referência AC 20 bin/base 35/50, utilizando o rácio entre os módulos de rigidez das camadas de desgaste correspondentes obtidos em laboratório.

No Quadro 8.1 é possível observar os módulos de rigidez adotados para as camadas de desgaste e ligação/base tendo em conta as considerações acima referidas para cada betume utilizado, para misturas sem incorporação de material fresado.

Quadro 8.1. Módulos de rigidez considerados para as misturas de desgaste (BD) e de ligação/base (MB) sem incorporação de material fresado.

Betume	Módulo de rigidez (MPa)	
	BD	MB
B35/50+F	2650	5000
PMB45/80	3650	6887
B010H6	4375	8255
B010S5	2250	4245
B07,5R20	1660	3132
BF15H6	2500	4717
BF12,5S5	2200	4151
BF15R20	850	1604

O mesmo tipo de abordagem foi efetuado para as misturas recicladas estudadas neste trabalho, sendo possível observar no Quadro 8.2 os módulos de rigidez das diferentes misturas em função do tipo de betume utilizado.

Quadro 8.2. Módulos de rigidez considerados para as misturas de desgaste (BD) e de ligação/base (MB) recicladas.

Betume	Módulo de rigidez (MPa)	
	BD	MB
B160/220+F	4100	7736
RBO15H6	4200	7925
RBO15S5	5350	10094
RBO15R20	4700	8868
RBF17,5H6	3900	7358
RBF17,5S5	4750	8962
RBF22,5R20	4000	7547

Por fim, importa salientar que se considerou a inclusão de duas camadas granulares de material britado de granulometria extensa em camada de base (BG) e em camada de sub-base (SbG) para todas as estruturas de pavimentos a dimensionar, cada uma com 20 cm de espessura, cujos módulos de deformabilidade são 400 e 200 MPa, respetivamente. Estes valores resultaram de ter sido considerado um módulo de deformabilidade de 100 MPa para o solo de fundação. O coeficiente de *Poisson* considerado para dimensionamento foi de 0,35 para todas as camadas.

8.1.2. Critérios de dimensionamento

De modo a simular diferentes cenários de utilização das misturas em estudo, as diversas estruturas de pavimento foram dimensionadas para dois níveis de tráfego, correspondentes a uma classe de tráfego mais elevada e uma classe de tráfego moderada, uma vez que as misturas SMA não se utilizam em pavimentos sujeitos a reduzidos níveis de tráfego (Garcia e Hansen, 2001).

Nesse sentido, através da consulta do manual MACOPAV (1995) foram selecionadas as classes de tráfego T1 e T3 para dimensionamento, que correspondem a valores de tráfego de projeto de 100 e 40 milhões de eixos-padrão de 80 kN, respetivamente.

Para além disso, considerou-se que as misturas AC 20 bin (MB) aplicadas nas camadas de ligação/base têm um volume de betume de 9% (valor a utilizar para efeito de dimensionamento, na lei de fadiga da Shell) e uma percentagem de betume de 4,8% (valor utilizado posteriormente na análise de custos e ambiental).

Para cada nível de tráfego, em seguida, procedeu-se ao dimensionamento das estruturas de pavimento em análise, determinando as espessuras das suas várias camadas de modo a garantir o cumprimento dos seguintes critérios de ruína: i) critério de fendilhamento por fadiga, relativo à extensão radial de tração na base das camadas betuminosas (ϵ_t), e; ii) critério de deformação permanente, relacionado com a extensão vertical de compressão no topo da camada de solo de fundação (ϵ_z) (Branco *et al.*, 2006). Durante a fase de dimensionamento, recorreu-se ao *software JPav* para determinação das extensões nesses locais do pavimento, aplicando posteriormente as leis de fadiga da *Shell* (Shell International Petroleum Company, 1978) relativas a cada um dos critérios já referidos para determinar o tráfego correspondente que a estrutura consegue suportar. Nesse sentido, o processo de obtenção das espessuras finais de cada pavimento em análise é iterativo e termina quando a razão entre o tráfego de projeto e o tráfego que a estrutura é capaz de suportar, denominado de dano, se encontra compreendida entre 80% e 100%. Importa salientar que o tráfego que a estrutura é capaz de suportar é o menor valor que resulta da aplicação dos dois critérios de ruína acima indicados.

As leis de fadiga da *Shell* foram desenvolvidas para o dimensionamento de pavimentos com misturas convencionais em condições de serviço e são uma das principais referências mundiais utilizadas para esse efeito, o que justifica a sua aplicação como referência neste estudo. No entanto, com base nos resultados de caracterização laboratorial apresentados nos capítulos anteriores, foi possível verificar que as leis de fadiga por fendilhamento das misturas com betumes modificados com resíduos são, em muitos casos, diferentes dos observados numa mistura convencional. Assim, foi necessário ajustar a lei de fadiga por fendilhamento da *Shell* para as diversas misturas betuminosas em estudo, com base nos resultados de laboratório, tal como se explica em seguida.

De forma a contabilizar a vida à fadiga obtida a nível laboratorial para as diferentes misturas estudadas, inicialmente considerou-se que a lei de fadiga da *Shell* devia ser aplicada de forma direta à mistura de controlo sem betume modificado (AC 20 B35/50). Em seguida, essa lei da *Shell* de referência foi afetada com diferentes fatores, consoante a extensão e o tipo de betume utilizado, obtendo-se desse modo leis da *Shell* ajustadas (curvas potenciais) para as restantes misturas em análise. Esses fatores foram obtidos

através da razão entre o número de ciclos da mistura de controlo (com o betume B35/50) e de cada uma das misturas com os restantes betumes em análise, para cada nível de extensão das leis de fadiga obtidas em laboratório. Os valores de micro extensão analisados variaram entre 100 e 500, com incrementos de 20. As leis de fadiga da *Shell* ajustadas (*Shell**) para cada uma das misturas com betumes modificados com resíduos sem material fresado são apresentadas na Figura 8.1.

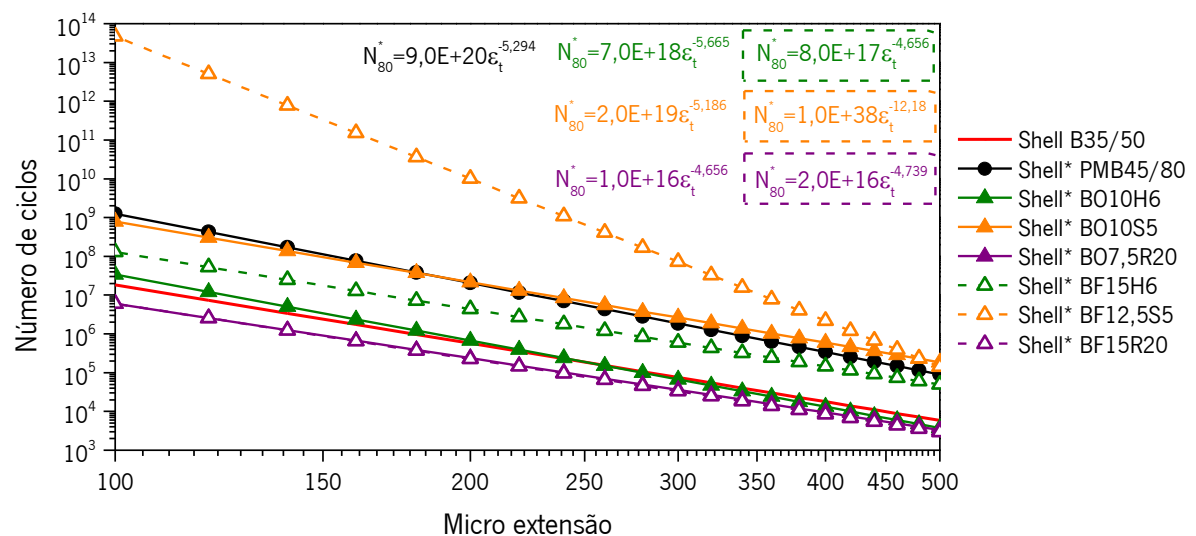


Figura 8.1. Lei de fadiga da *Shell* aplicada à mistura de controlo e leis da *Shell* ajustadas para as misturas com betumes modificados com resíduos sem incorporação de material fresado.

No caso das misturas recicladas estudadas neste trabalho, a mistura usada como referência para determinar a lei de fadiga da *Shell* foi a mistura AC 20 RB160/220, dado que esta corresponde à mistura de controlo utilizada nas misturas SMA recicladas (SMA-RB160/220+F). Em seguida, o procedimento de ajuste das leis de fadiga já referido também foi aplicado nestas misturas recicladas, isto é, a lei da *Shell* determinada para a mistura reciclada de controlo foi afetada com os fatores correspondentes a cada uma das restantes misturas recicladas em análise, para cada nível de extensão, obtendo-se novas leis da *Shell* ajustadas. As representações gráficas da lei de fadiga da *Shell* para a mistura reciclada de controlo (*Shell* RB160/220) e das leis de fadiga da *Shell* ajustadas (*Shell**) para as outras misturas recicladas com os betumes modificados com resíduos podem ser observadas na Figura 8.2.

Quer nas misturas sem material fresado, quer nas misturas recicladas, é possível verificar uma variação significativa das leis de fadiga por fendilhamento das diversas misturas em estudo, o que pode dar origem a diferenças consideráveis nos resultados de dimensionamento.

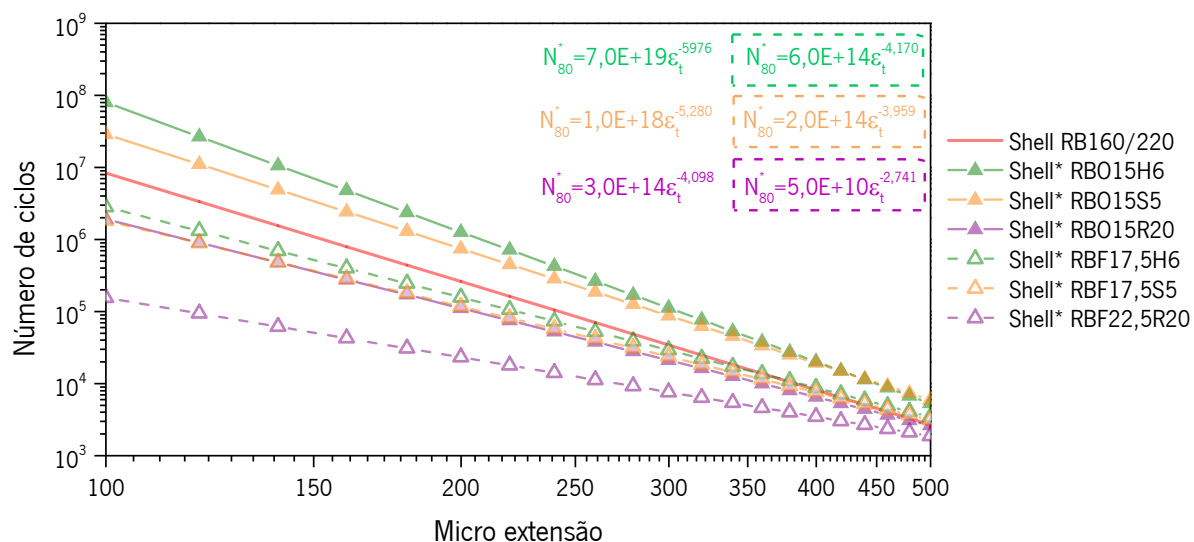


Figura 8.2. Lei de fadiga da *Shell* aplicada à mistura reciclada de controle e leis da *Shell* ajustadas para as misturas recicladas com betumes modificados com resíduos.

8.1.3. Resultados de dimensionamento das estruturas de pavimentos consideradas

Após definição dos tipos de estrutura de pavimento a utilizar e dos módulos de rigidez correspondentes, bem como das leis de fadiga aplicáveis em cada caso, foi possível proceder à determinação das espessuras finais das estruturas de pavimento consideradas, que foram o resultado final do processo de dimensionamento apresentado.

Os resultados de dimensionamento das estruturas dos pavimentos com misturas betuminosas sem material fresado, para a classe de tráfego T1, podem ser observados na Figura 8.3, bem como a variação da espessura das camadas betuminosas relativamente à mistura de controlo (B35/50).

Para esta classe de tráfego mais elevada (T1), e devido à combinação de módulo de rigidez e resistência à fadiga baixos, os betumes modificados com borracha (BO7,5R20 e BF15R20) não permitiram dimensionar uma estrutura de pavimento que cumpra os critérios de ruína, razão pela qual não se apresentam esses resultados. Apesar dos resultados menos promissores em relação à vida à fadiga, estas misturas com borracha apresentaram elevada resistência à deformação permanente, justificando a sua aplicação em camadas de desgaste nas situações em que essa propriedade seja mais relevante.

O betume modificado comercial (PMB45/80) permitiu a redução de 0,01 m no total da espessura das camadas betuminosas comparativamente à estrutura de controlo (com o betume B35/50).

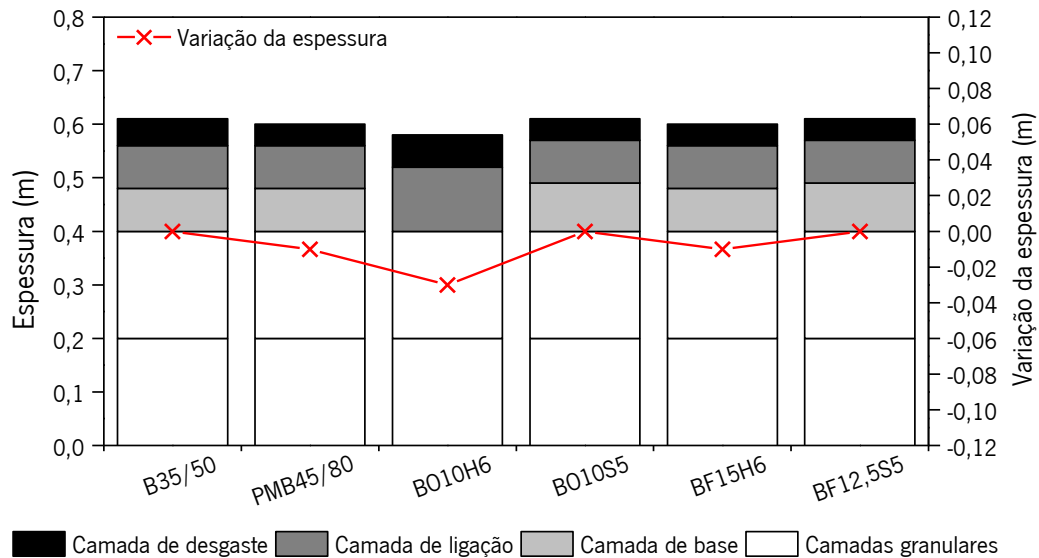


Figura 8.3. Estruturas dos pavimentos com misturas sem material fresado, em função do betume utilizado, dimensionadas para a classe de tráfego T1.

Relativamente aos betumes modificados com SBS (BO10S5 e BF12,5S5) verifica-se que os mesmos originaram estruturas com uma espessura de camadas betuminosas igual à da estrutura de controlo. À partida, seria de esperar uma maior redução de espessura das camadas betuminosas contendo estes betumes modificados com SBS, na medida em que essas misturas apresentam uma elevada vida à fadiga. Contudo, as mesmas misturas apresentam módulos de rigidez a 20 °C muito baixos, que condicionam o comportamento do pavimento, em especial no que diz respeito ao critério de ruína relacionado com a deformação permanente. Isto é, neste caso a estrutura do pavimento não fica condicionada pelo critério de fendilhamento por fadiga das camadas betuminosas, mas antes pelo critério de deformação permanente no topo do solo de fundação.

No caso das estruturas de pavimento cujas camadas betuminosas são produzidas com os betumes modificados com HDPE (BO10H6 e BF15H6) verifica-se uma redução da espessura total das camadas betuminosas de 0,03 m e 0,01 m, respetivamente, quando comparadas com a espessura total das camadas betuminosas da estrutura de controlo (B35/50). Apesar destas misturas exibirem vidas à fadiga inferiores às misturas com SBS, possuem um módulo de rigidez mais elevado, o que contribuiu de forma positiva para o comportamento geral da estrutura, originando assim a maior redução de espessura para este nível de tráfego. Como os betumes utilizados nestas misturas são modificados apenas com resíduos (óleo de motor usado, fundo de coluna e HDPE), isso ainda traz outras vantagens ambientais associadas.

Em seguida procedeu-se ao dimensionamento das estruturas dos pavimentos com as mesmas misturas betuminosas sem material fresado, mas agora para a classe de tráfego T3, cujos resultados podem ser observados na Figura 8.4, bem como a variação da espessura das camadas betuminosas relativamente à mistura de controlo (B35/50).

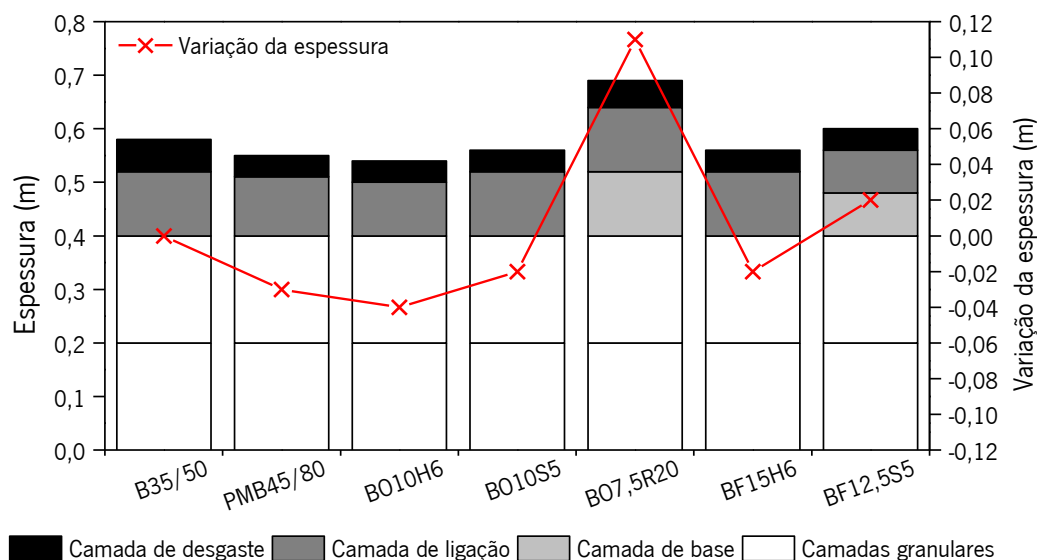


Figura 8.4. Estruturas dos pavimentos com misturas sem material fresado, em função do betume utilizado, dimensionadas para a classe de tráfego T3.

Para esta classe de tráfego moderado (T3) há uma menor exigência estrutural do que para a classe T1, o que foi favorável para a utilização dos betumes modificados desenvolvidos neste trabalho. De facto, neste caso praticamente todas as estruturas de pavimento com betumes modificados sofreram uma maior redução na espessura das camadas betuminosas, por comparação com a estrutura de controlo, do que a verificada para o nível de tráfego T1. Nesse sentido, para este nível de tráfego já foi possível dimensionar a estrutura de pavimento relativa à mistura com betume borracha BO7,5R20 de modo a cumprir os critérios de ruína. Contudo, verificou-se mais uma vez que o betume modificado com borracha e fundo de coluna BF15R20 não permitiu o dimensionamento de uma estrutura de pavimento que cumpra os critérios de ruína, apesar do seu excelente desempenho de resistência à deformação permanente.

Assim, a estrutura de pavimento com o betume modificado comercial (PMB45/80) apresenta uma redução de 0,03 m comparativamente à estrutura de pavimento de controlo (B35/50), enquanto a redução da espessura total das camadas betuminosas das estruturas com os betumes BO10S5 e

BF15H6 foi de 0,02 m. Tal como se verificou para a classe de tráfego T1, a estrutura de pavimento que apresentou a maior redução de espessura das camadas betuminosas foi a que utilizou o betume B010H6, modificado com HDPE e óleo de motor usado, cuja redução foi de 0,04 m.

Por outro lado, a utilização do betume BF12,5S5 originou um aumento de 0,02 m na espessura total das camadas betuminosas, de modo a cumprir os critérios de ruína, apesar da elevada vida à fadiga dessas misturas. Este aumento de espessura é uma consequência do reduzido módulo de rigidez desta mistura, devido à elevada quantidade de fundo de coluna utilizada na modificação desse betume. Ao utilizar o betume borracha B07,5R20 também foi necessário aumentar em 0,11 m a espessura total das camadas betuminosas comparativamente à estrutura de controlo para cumprir os critérios de ruína exigidos (devido ao baixo módulo de rigidez e reduzida vida à fadiga desta mistura).

Em resumo, pode concluir-se que as diferenças entre os vários betumes estudados são mais visíveis ao dimensionar pavimentos sujeitos a níveis de tráfego moderados do que em níveis de tráfego mais elevados. De facto, para níveis de tráfego mais exigentes, o módulo de rigidez mais reduzido de algumas misturas produzidas com os betumes desenvolvidos neste trabalho (com óleo ou fundo de coluna) não permite tirar o devido proveito da sua maior vida à fadiga, dado que o critério condicionante de dimensionamento passa a ser a deformação permanente no solo de fundação.

Também se verificou que ao utilizar betumes modificados com resíduos, e para um nível de tráfego moderado, é possível reduzir até 0,04 m a espessura das camadas betuminosas sem comprometer o desempenho do pavimento. Para além disso, pode ainda concluir-se que as reduções de espessura são maiores nos pavimentos cujas misturas são produzidas com betumes modificados com óleo de motor usado, em comparação com o fundo de coluna, o que está relacionado com as menores percentagens de óleo utilizadas e, consequentemente, a menor redução do módulo de rigidez dessas misturas.

Em seguida procedeu-se ao dimensionamento das estruturas dos pavimentos com misturas recicladas, para a classe de tráfego T1 (Figura 8.5), e à determinação da variação da espessura das camadas betuminosas relativamente à mistura reciclada de controlo (neste caso, a mistura RB160/220).

Em comparação com a estrutura de referência, é possível observar que apenas as estruturas relativas às misturas recicladas com os betumes RB015H6 e RB015S5 apresentam uma redução de espessura das camadas betuminosas, respetivamente de 0,02 m e 0,05 m. Neste caso a maior redução foi

conseguida ao utilizar SBS, dado que a maior rigidez das misturas recicladas permite salientar o efeito positivo da maior resistência à fadiga da mistura com este polímero.

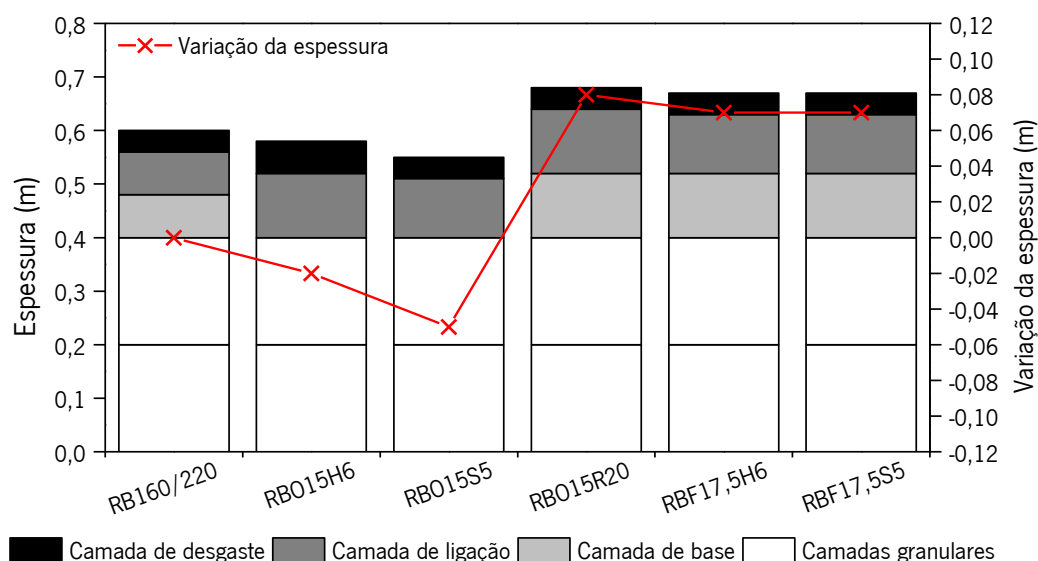


Figura 8.5. Estruturas dos pavimentos com misturas recicladas, em função do betume utilizado, dimensionadas para a classe de tráfego T1.

Comparativamente à estrutura de controlo, as restantes estruturas com misturas recicladas (produzidas com os betumes RB015R20, RBF17,5H6 e RBF17,5S5) necessitam de uma maior espessura das camadas betuminosas de modo a cumprirem os critérios de ruína. Este aumento de espessura resulta da utilização de maiores quantidades de fundo de coluna ou da utilização de borracha na modificação destes betumes, cujas consequências para as misturas recicladas foram essencialmente a redução da sua vida à fadiga.

Importa ainda salientar que não foi possível dimensionar a estrutura referente ao betume RBF22,5R20 devido à sua baixa resistência à fadiga (principalmente a extensões baixas), o que não permite satisfazer os critérios de ruína relacionados com o fendilhamento por fadiga e a deformação permanente. Todavia, a mistura reciclada SMA-RBF22,5R20 apresenta uma elevada resistência à deformação permanente, que não é contabilizada aquando do processo de dimensionamento do pavimento mas poderá ser de extrema importância noutras aplicações.

Finalmente, procedeu-se ao dimensionamento das estruturas dos pavimentos com as mesmas misturas recicladas, mas agora para a classe de tráfego T3, cujos resultados são apresentados na Figura 8.6. Tal como tinha acontecido para o nível de tráfego mais elevado (T1), a utilização dos betumes RB015H6 e

RBO15S5 permitiu reduzir a espessura da estrutura do pavimento (0,02 m e 0,03 m, respetivamente), com o melhor resultado a ser exibido para o betume modificado com SBS e óleo de motor usado.

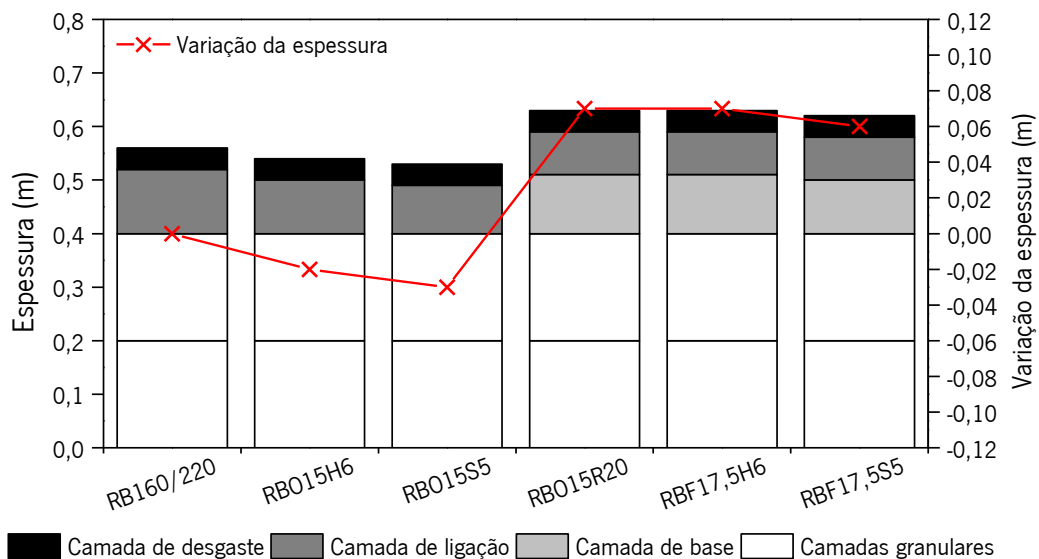


Figura 8.6. Estruturas dos pavimentos com misturas sem material fresado, em função do betume utilizado, dimensionadas para a classe de tráfego T3.

Por outro lado, houve um aumento de espessura para as estruturas relativas aos betumes RBO15R20, RBF17,5H6 e RBF17,5S5 (0,07 m, 0,07 m e 0,06 m, respetivamente). O facto destas três últimas estruturas necessitarem de maiores espessuras de camadas ligadas, comparativamente à mistura de controlo, resulta da sua menor vida à fadiga, apesar dos módulos de rigidez serem semelhantes. Mais uma vez, não foi possível dimensionar a estrutura referente ao betume RBF22,5R20, de modo a cumprir os critérios de ruína, apesar da redução do tráfego de projeto para a classe T3.

A diferença de espessuras das camadas betuminosas recicladas obtidas para os dois níveis de tráfego de projeto é inferior à verificada para as misturas sem material fresado. Esta menor dependência das misturas recicladas em relação ao tráfego de projeto resulta dos seus módulos de rigidez mais elevados, para os vários tipos de betume utilizado, apesar da vida à fadiga também influir neste resultado.

Nestas estruturas de pavimentos com misturas recicladas é mais notória a diferença de comportamento entre os betumes modificados com óleo de motor usado e com fundo de coluna (com exceção dos betumes produzidos com borracha, que apresentaram sempre uma reduzida vida à fadiga). De facto, a utilização de betumes com óleo de motor usado resultou em estruturas “equivalentes” menos espessas,

como consequência da maior vida à fadiga destas misturas (em especial ao ser combinado com SBS). A utilização de maiores quantidades de fundo de coluna na modificação de betumes terá sido responsável pela menor vida à fadiga dessas misturas.

8.2. Análise económica

8.2.1. Custo de produção dos betumes

Para quantificar o custo de produção dos betumes modificados com resíduos foi necessário conhecer os custos dos diferentes materiais utilizados na sua produção. Em primeiro lugar obteve-se junto dos fornecedores o custo dos diferentes betumes comerciais, nomeadamente o custo do betume base utilizado na modificação e betume de controlo B35/50 (323€/ton), do betume modificado comercial PMB45/80 (503€/ton) e, por último, o custo do betume B160/220 (320€/ton).

No que diz respeito ao custo dos polímeros verificou-se junto dos fornecedores que o polímero com o custo mais elevado é o SBS, cujo custo é de 2000€/ton (tal como seria de esperar por ser um polímero virgem). Os resíduos poliméricos HDPE e CR exibem custos bem mais reduzidos do que o polímero SBS, nomeadamente de 1000€/ton e 260€/ton.

Contudo, a principal dificuldade prendeu-se com a obtenção do custo dos substitutos parciais do betume, ou seja, o óleo de motor usado e o fundo de coluna. No primeiro caso, grande parte do óleo de motor usado é regenerado para produzir novo óleo de motor, e apenas os óleos que não cumprem os requisitos necessários para serem admitidos no processo de valorização são reencaminhados para aterros ou valorização energética. No caso do fundo de coluna, atualmente não há nenhum tipo de valorização desse material, cujo destino final é o aterro. Assim, torna-se difícil quantificar o custo destes produtos caso sejam utilizados para outros fins, pois existem outras possíveis oportunidades de negócio inerentes à utilização destes materiais, razão pela qual a empresa fornecedora não facultou esses números.

Para ultrapassar esta dificuldade, optou-se por considerar que o custo do óleo de motor usado varia entre 70 a 90% do custo do betume B35/50, enquanto o custo do fundo de coluna varia entre 10 a 30% do custo do betume B35/50. Desta forma, salvaguarda-se o facto de ser possível regenerar o óleo de motor usado, o que consequentemente aumenta o seu custo ao poder ser utilizado para outros fins. No caso do fundo de coluna, apesar de a empresa ter um custo de deposição deste material em aterro (o que até

poderia implicar um proveito), para salvaguardar um lucro associado à venda deste resíduo considerou-se o custo anteriormente mencionado.

Devido à dificuldade em quantificar com mais exatidão o custo efetivo de produção dos betumes modificados com resíduos, nesta análise partiu-se do pressuposto que o custo de modificação desses betumes seria sempre de 80€/ton. Este valor foi obtido a partir de outros custos conhecidos, com base nos seguintes factos: i) a diferença entre o custo do betume modificado comercial PMB45/80 e do betume B35/50 é igual a 180€/ton; ii) considerou-se que o betume PMB45/80 foi modificado com 5% de SBS (o polímero mais utilizado na modificação de betumes para pavimentação), o que implica um custo de 100€ devido ao polímero; e, iii) a diferença entre os valores anteriores foi o custo estimado de modificação de betumes considerado nesta análise.

De facto, este custo até será conservativo tendo em conta que os betumes modificados com resíduos, desenvolvidos neste trabalho, são produzidos sem utilização de mais aditivos, para um tempo de produção de 20 min, num equipamento de funcionamento fácil e sem necessidade adicionais de aquecimento (além do betume) durante o processo.

Partindo dos pressupostos mencionados anteriormente e da informação obtida acerca dos custos dos diferentes materiais, o custo dos betumes modificados com resíduos deverá ser obtido através da Equação 8.1:

$$\text{Custo}_{\text{betumes modificados com resíduos}} (\text{€/ton}) = \frac{P_B \times C_B + P_{SP} \times C_{SP} + P_P \times C_P}{100} + C_M \quad (8.1)$$

em que,

P_B é a percentagem de betume B35/50;

C_B é o custo do betume B35/50 em €/ton;

P_{SP} é a percentagem de substituto parcial utilizado (óleo de motor usado ou fundo de coluna);

C_{SP} é o custo do substituto parcial utilizado (óleo de motor usado ou fundo de coluna) em €/ton;

P_P é a percentagem do polímero utilizado (HDPE ou SBS ou CR);

C_P é o custo do polímero utilizado (HDPE ou SBS ou CR) em €/ton; e,

C_M custo de modificação do betume em €/ton.

Nesse sentido, o custo dos betumes modificados com resíduos para misturas betuminosas sem material fresado é apresentado na Figura 8.7.

O custo médio dos betumes modificados com resíduos é 30% superior ao custo do betume base usado no processo de modificação (B35/50). Apesar disso, no caso do betume modificado comercial (PMB45/80) esse aumento de custo é da ordem dos 56%. A introdução dos diferentes modificadores, bem como o processo de modificação, acarretam custos extras, o que faz com que o preço dos betumes modificados com resíduos seja superior ao betume de controlo B35/50. Contudo, importa salientar que em geral estes betumes têm um desempenho superior ao betume base, o que pode trazer vantagens ao avaliar a sua aplicação em estruturas de pavimentos “equivalentes”.

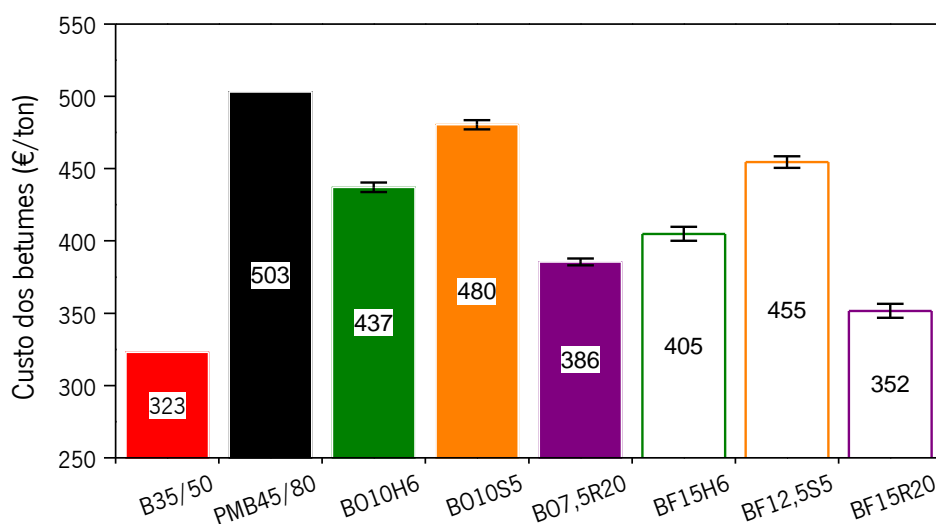


Figura 8.7. Custo médio dos betumes de controlo e dos betumes modificados com resíduos para misturas sem material fresado.

Quando se compara os custos dos betumes modificados com resíduos com o custo do betume modificado comercial PMB45/80, verifica-se que em média os custos dos betumes desenvolvidos neste trabalho são inferiores em cerca de 17%. Os novos betumes com borracha de pneus usados apresentam o custo mais baixo, seguindo-se os betumes modificados com HDPE, enquanto a modificação com SBS é naturalmente mais cara. Para o mesmo polímero, e tal como seria de esperar, o custo dos betumes modificados com fundo de coluna são inferiores aos dos betumes modificados com óleo de motor usado, quer porque o seu custo é inferior, quer porque se utiliza em maiores percentagens em substituição do betume.

O intervalo de valores considerados para o custo do óleo de motor usado e para o fundo de coluna não afeta significativamente os custos dos betumes finais, como se verifica pelas barras de erro apresentadas. De facto, a incerteza associada ao custo destes materiais não terá um grande impacto na análise económica destas soluções, que são mais afetadas por outros fatores. Assim, pode concluir-se que os betumes modificados com resíduos, desenvolvidos neste trabalho, conseguem associar um bom desempenho, muitas vezes superior ao do betume modificado comercial, a um custo mais reduzido comparativamente ao mesmo.

Em seguida determinou-se o custo dos betumes modificados com resíduos desenvolvidos para utilização nas misturas recicladas (Figura 8.8). Estes betumes apresentaram, em média, um custo 27% superior ao do betume de controlo B160/220 (320€/ton), sendo esse incremento similar ao verificado anteriormente nos betumes modificados para as misturas sem material fresado.

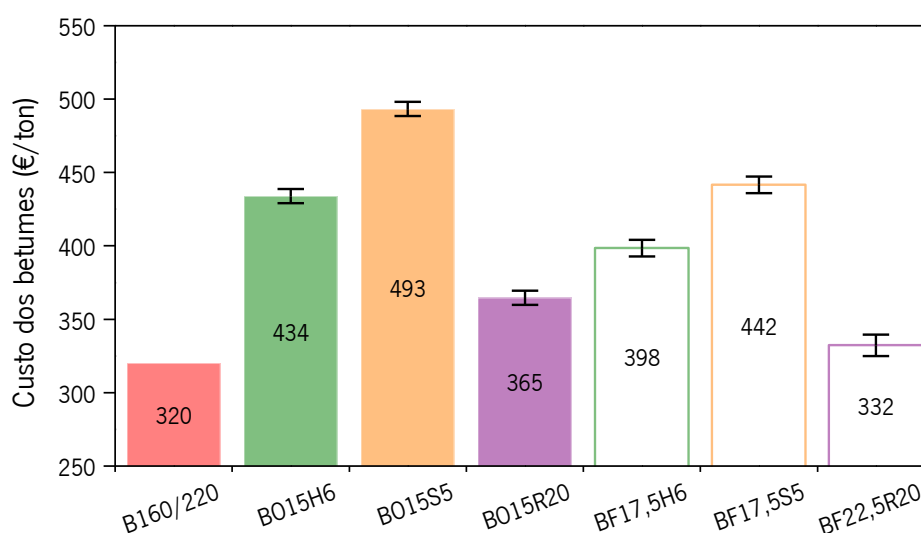


Figura 8.8. Custo médio do betume de controlo e dos betumes modificados com resíduos para misturas recicladas.

Pode ainda constatar-se que os betumes modificados com borracha exibem os custos mais baixos (365€/ton e 332€/ton) devido ao reduzido custo da borracha em comparação com os outros polímeros. Os betumes modificados com HDPE também apresentam custos inferiores aos betumes modificados com SBS. Logo, por comparação com os polímeros virgens, a utilização de resíduos poliméricos permite associar vantagens ambientais a menores custos finais de produto. Mais uma vez, comprova-se que o baixo custo do fundo de coluna afeta de forma positiva o custo dos betumes modificados com resíduos para misturas recicladas, quando comparados com os betumes modificados com óleo de motor usado.

A variação associada à incerteza sobre o custo do óleo de motor usado e fundo de coluna não afeta significativamente os custos dos betumes finais, como se verifica pelas barras de erro apresentadas. Por último, importa salientar que o custo do betume modificado com 22,5% de fundo de coluna e 20% de borracha tende a aproximar-se bastante do custo do betume de controlo B160/220 não modificado, o que demonstra que estas soluções podem ser muito interessantes para futura comercialização.

8.2.2. Custo das estruturas de pavimentos resultantes da utilização dos betumes com resíduos

De modo a determinar o custo das diferentes estruturas de pavimento com um desempenho equivalente, dimensionadas anteriormente para refletir a utilização de cada um dos betumes em estudo, foram considerados os seguintes fatores: i) o custo das diferentes misturas utilizadas no dimensionamento do pavimento (SMA 14 ou AC 20); ii) o aumento do custo dos betumes comparativamente ao custo do betume de controlo B35/50; iii) se a mistura contém ou não material fresado; iv) o custo do aquecimento adicional dos agregados para temperaturas de produção superiores às da mistura convencional; e, v) o custo das fibras. O procedimento para a determinação dos custos das misturas sem material fresado para os diferentes pavimentos em estudo pode ser visualizado no fluxograma da Figura 8.9.

Importa salientar que apenas se contabilizou os custos das misturas betuminosas no cálculo do custo da estrutura de pavimento, uma vez que se pretende fazer uma análise comparativa das soluções, e as camadas granulares são iguais em todas as estruturas.

Assim, com base na informação fornecida por várias empresas na área da pavimentação, considerou-se que a mistura AC20 com betume B35/50 tem um custo médio de 28,08€/ton. Por sua vez, os custos da mistura SMA basearam-se em valores especificados na literatura, dado que não se produz estas misturas de forma corrente em Portugal. Verifica-se que as misturas SMA apresentam um custo 50% a 61% superior a uma mistura AC 20 (Hassim *et al.*, 2005), ou um custo compreendido entre os 72,77\$ e os 80,49\$, correspondente a 62,71€ e 69,37€, de acordo com Leng *et al.* (2017). Para garantir que o custo das misturas SMA contempla os valores especificados na literatura, decidiu-se considerar o valor médio de todos os custos referidos, nomeadamente o valor de 54,85€/ton, bem como, o valor mínimo e máximo de 42,12€/ton e 69,37€/ton, respetivamente, para uma análise de sensibilidade.

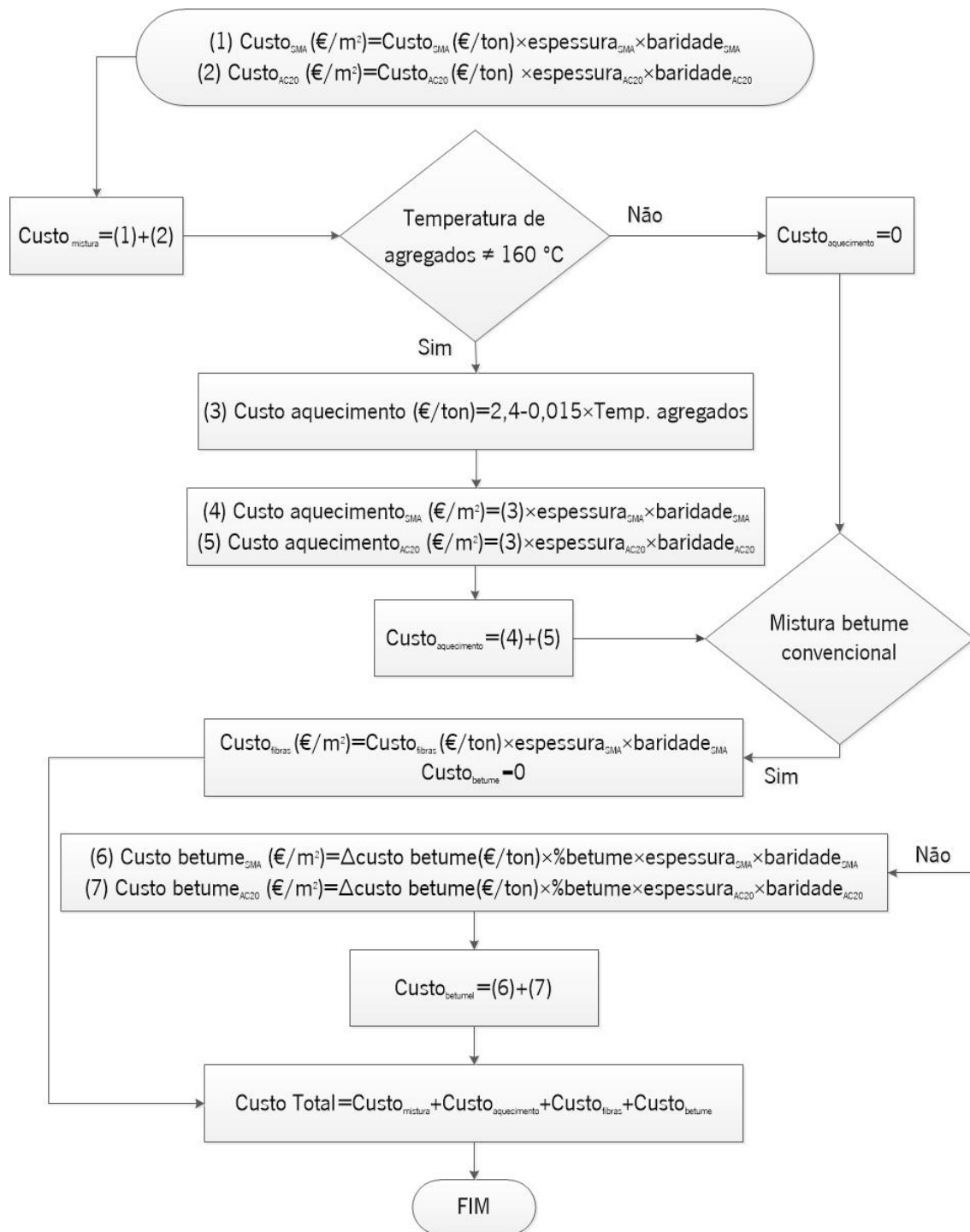


Figura 8.9. Fluxograma da análise económica das misturas betuminosas sem material fresado em estudo.

Como os betumes modificados com resíduos exigem temperaturas de produção superiores à da mistura convencional, optou-se por considerar nesta análise o custo desse acréscimo de temperatura, nomeadamente o custo de *fuel* necessário para o aquecimento extra exigido. O estudo de Ferreira (2009) refere um custo de *fuel* de 2,4€/ton para aquecimento de uma mistura com uma temperatura de

produção similar à da mistura de referência deste estudo (com o betume B35/50). A partir desse estudo extrapolou-se o custo de *fuel* para as temperaturas de produção das restantes misturas em análise e calculou-se o aumento do custo relativamente à mistura de referência. Deste modo, o custo acrescido de aquecimento necessário para atingir as temperaturas de produção de 180 °C das misturas com betumes modificados com resíduos e da mistura com betume modificado comercial é de 0,30€/ton.

No caso das misturas com betume não modificado, e tal como mencionado anteriormente, utilizaram-se fibras para impedir o escorrimento do betume. Como tal, o custo das fibras deverá ser contabilizado no custo das misturas SMA com betume convencional. O custo das fibras é de 3000€/ton e a percentagem utilizada foi de 0,3% do peso total da mistura.

A análise económica dos pavimentos com as misturas recicladas em estudo apresenta algumas especificidades, nomeadamente: i) o facto de apenas 50% da mistura utilizar agregados novos (uma vez que os restantes 50% correspondem a material fresado); ii) o facto de apenas uma pequena percentagem de betume novo ser adicionado; e, iii) o facto de apenas uma parte dos agregados (85%) ter de ser aquecida aquando do processo de produção (dado uma fração do material fresado ser introduzida a frio). Assim, o procedimento para a determinação dos custos das misturas recicladas para os diferentes pavimentos em análise é o apresentado no fluxograma da Figura 8.10.

Nas misturas recicladas é necessário contabilizar o custo do material fresado, que segundo Pereira e Santos (2006) é de aproximadamente 20€/m³ (o que engloba o processo de fresagem, transporte para central e deposição em depósito próprio). Dado que 50% das misturas recicladas finais são compostas por material fresado, espera-se obter um custo inferior às misturas correntes, ao reduzir a quantidade de agregados e betume novo a introduzir, bem como a quantidade de fresado a depositar em aterros e o transporte de agregados novos.

Como parte do material fresado (fração fina) é introduzida a frio, importa salientar que é imprescindível aumentar a temperatura de aquecimento dos agregados novos e da fração grossa do material fresado para obter a temperatura de produção exigida. Assim, a mistura reciclada de controlo tem um custo acrescido de aquecimento de 0,30€/ton para garantir a temperatura de produção, enquanto o aumento desse custo para a mistura reciclada com óleo de motor usado e borracha é de 0,60€/ton e para as restantes misturas recicladas (com HDPE e SBS) este aumento é de 0,75€/ton.

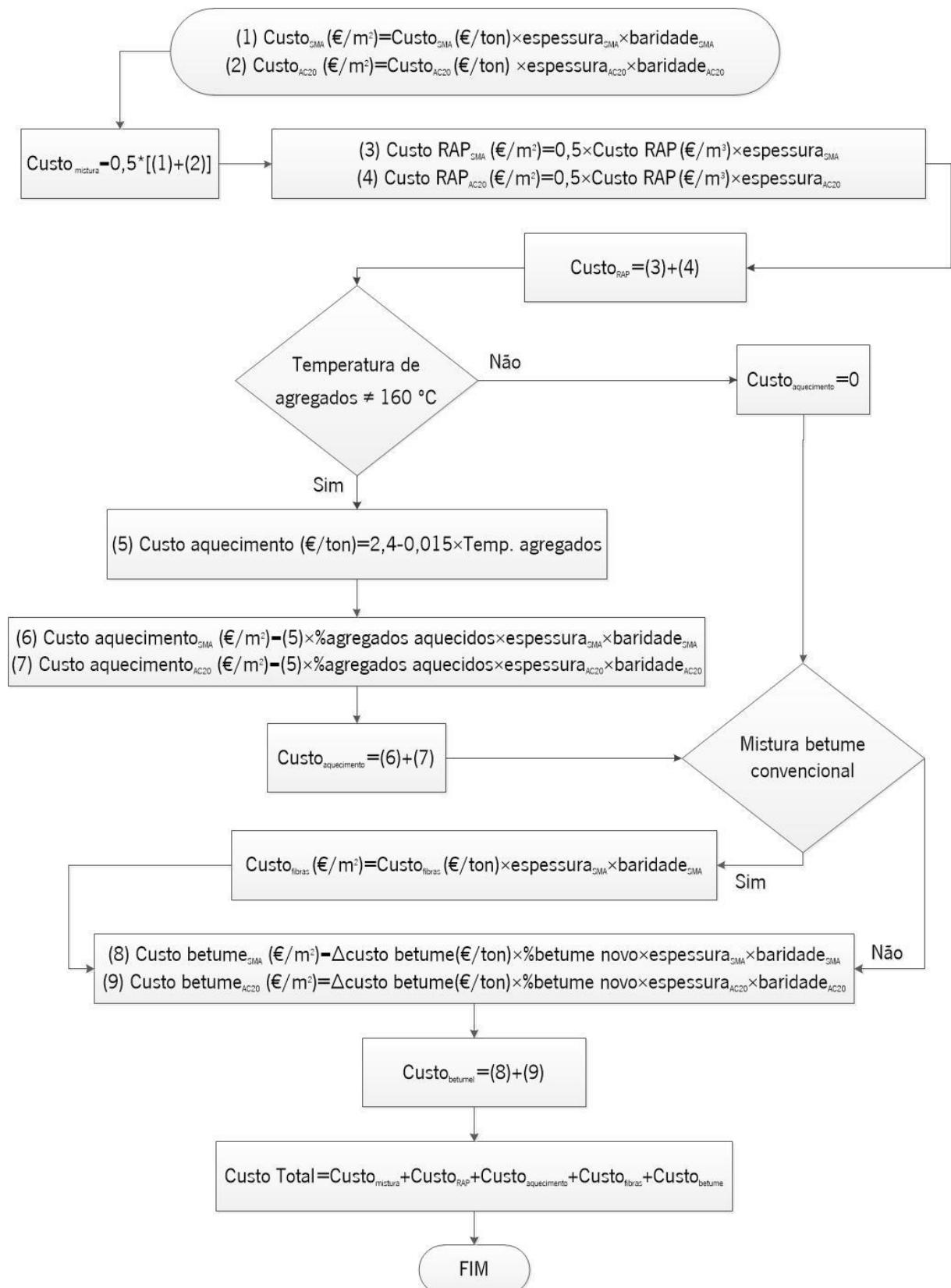


Figura 8.10. Fluxograma da análise económica das misturas recicladas em estudo.

Com base nos pressupostos anteriormente mencionados, foi possível determinar o custo total das misturas sem material fresado, em função do betume utilizado, para estruturas de pavimentos com um desempenho equivalente dimensionadas para uma classe de tráfego T1, cujos resultados são apresentados na Figura 8.11. A estrutura de pavimento de controlo, cujas misturas foram produzidas com betume B35/50, apresentam um custo (18,19€/m²) inferior às restantes misturas, exceto para a mistura produzida com o betume modificado BF15H6 (18,09€/m²).

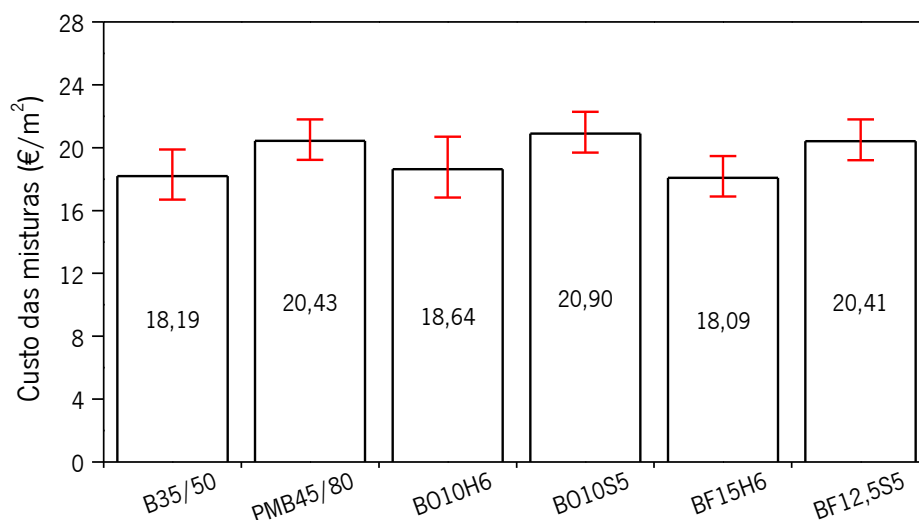


Figura 8.11. Custo das misturas betuminosas sem material fresado, em função do betume utilizado, para estruturas “equivalentes” dimensionadas para a classe de tráfego T1.

Deste modo, a estrutura de pavimento com o custo das misturas betuminosas mais baixo é aquela cujas misturas são produzidas com betume modificado com 15% de fundo de coluna e 6% de HDPE (BF15H6). Este betume modificado, composto por 21% de resíduos, já tinha apresentado um dos custos mais baixos entre os novos betumes desenvolvidos, o que aliado à redução de espessura do pavimento em comparação com o betume B35/50, torna esta solução mais vantajosa que a convencional. Neste caso, a utilização deste betume alia o bom desempenho mecânico com um baixo custo.

As restantes soluções desenvolvidas neste trabalho têm um custo um pouco mais alto, mas que em geral é inferior ao das misturas produzidas com betume modificado comercial PMB45/80 (20,43€/m²), exceto para as misturas com betume BF12,5S5 que exibem um custo ligeiramente superior (20,90€/m²). Para o mesmo tipo de polímero, pode ainda verificar-se que as misturas com fundo de coluna são ligeiramente mais baratas do que as que utilizam óleo de motor usado (em média 0,52€/m²). Também se verifica que as misturas com HDPE exibem custos relativamente mais baixos do que as misturas com SBS.

Tendo em conta a incerteza relativa ao custo das misturas SMA, optou-se por considerar a variação dos custos dessas misturas referida na literatura, tal como foi mencionado anteriormente, para avaliar qual o efeito que essa variabilidade provoca nos custos finais das diferentes estruturas de pavimento estudadas (representada pelas barras de erro). Nesse sentido, as variações de custo das várias soluções em estudo foi similar, sendo em média 2,89€/m². A maior variação entre o custo máximo e mínimo ocorreu para as misturas com betume BO10H6, o que resulta da espessura da camada de desgaste desta estrutura ser superior à das restantes. Assim, verifica-se que a espessura da camada de desgaste, produzida com mistura SMA pode ter uma grande influência no custo total do pavimento.

Para a classe de tráfego inferior (T3) verifica-se que alguns betumes modificados com resíduos ainda conseguem ter uma influência mais positiva no preço global das misturas betuminosas aplicadas no pavimento, por comparação com os resultados para a classe de tráfego T1, dado que essas misturas apresentam custos inferiores aos da mistura com o betume de controlo B35/50 (Figura 8.12). Neste caso as misturas produzidas com o betume modificado comercial (15,97€/m²), os betumes modificados com HDPE (14,07€/m² e 14,98€/m²) e o betume modificado com óleo de motor usado e SBS (16,54€/m²) exibem custos inferiores aos das misturas com betume B35/50. Este resultado foi consequência direta da maior redução de espessura observada durante o dimensionamento destas estruturas de pavimento para o nível de tráfego intermédio (T3).

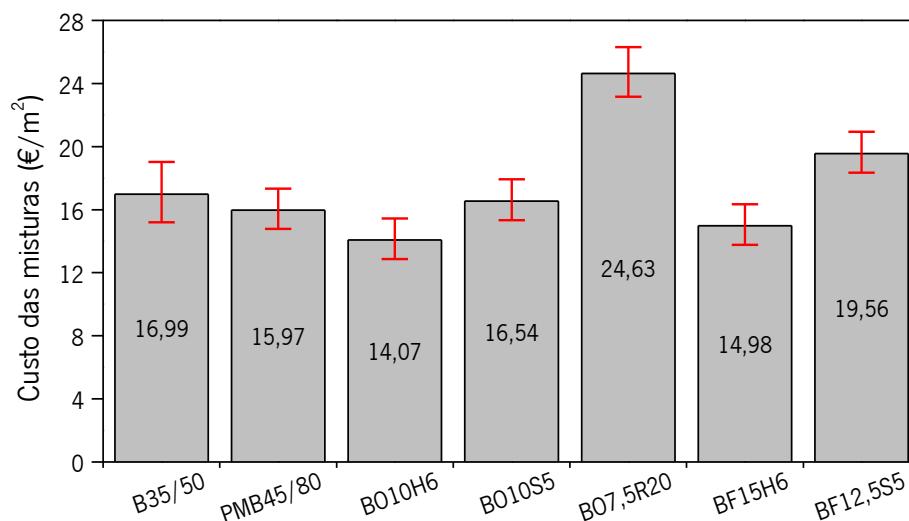


Figura 8.12. Custo das misturas betuminosas sem material fresado, em função do betume utilizado, para estruturas “equivalentes” dimensionadas para a classe de tráfego T3.

Por outro lado, as estruturas de pavimento cujas misturas foram produzidas com os betumes B07,5R20 e BF12,5S5 apresentaram custos superiores às misturas com o betume de controlo B35/50 ou com o betume modificado comercial PMB45/80. No primeiro caso, as elevadas espessuras de misturas betuminosas necessárias para cumprir os critérios de dimensionamento contribuem para o aumento do custo das mesmas, apesar do baixo custo do betume modificado com borracha. No segundo caso, o elevado custo do polímero SBS, e consequentemente do betume em questão, terá sido a principal causa do maior custo das misturas com este polímero.

Assim, para este nível de tráfego intermédio constata-se que a aplicação de betumes modificados com resíduos tem um efeito mais positivo na diminuição do custo global das misturas aplicadas nos pavimentos em estudo. Ao comparar os dois níveis de tráfego (T1 e T3) também se verificou uma inversão do custo das misturas com fundo de coluna ou com óleo de motor usado, o que se deve à redução mais significativa da espessura das estruturas de pavimento com betumes modificados com óleo de motor usado para o nível de tráfego T3. Tal facto vem demonstrar que apesar dos betumes modificados com fundo de coluna exibirem um menor custo, a espessura das camadas betuminosas pode ter um peso mais significativo no custo final das misturas.

Mais uma vez pode constatar-se que a variação do custo das misturas SMA (barras de erro) não altera a tendência verificada no custo médio, mantendo-se uma média da variação entre o custo máximo e mínimo de 2,84€/m², que é similar à obtida nas estruturas de pavimento para a classe de tráfego T1.

Em seguida, para se avaliar de forma mais completa as possíveis vantagens da introdução de material fresado nas misturas aplicadas nas várias camadas do pavimento, optou-se por comparar as misturas recicladas com a mistura convencional de referência, isto é, sem introdução de material fresado. Assim, compararam-se as diversas misturas recicladas com os betumes em estudo, incluindo o betume de controlo RB160/220, com a estrutura de pavimento com misturas produzidas com betume B35/50.

Apesar destes betumes modificados com resíduos terem um custo mais elevado do que o betume de referência (B35/50), os mesmos são utilizados em menor percentagem nas misturas recicladas, dado que uma parte significativa da mistura resulta da introdução do material fresado. Deste modo, todas as soluções com misturas recicladas apresentam menor custo do que a mistura de referência sem material fresado (B35/50), como se observa na Figura 8.13 para estruturas “equivalentes” dimensionadas para o nível de tráfego T1.

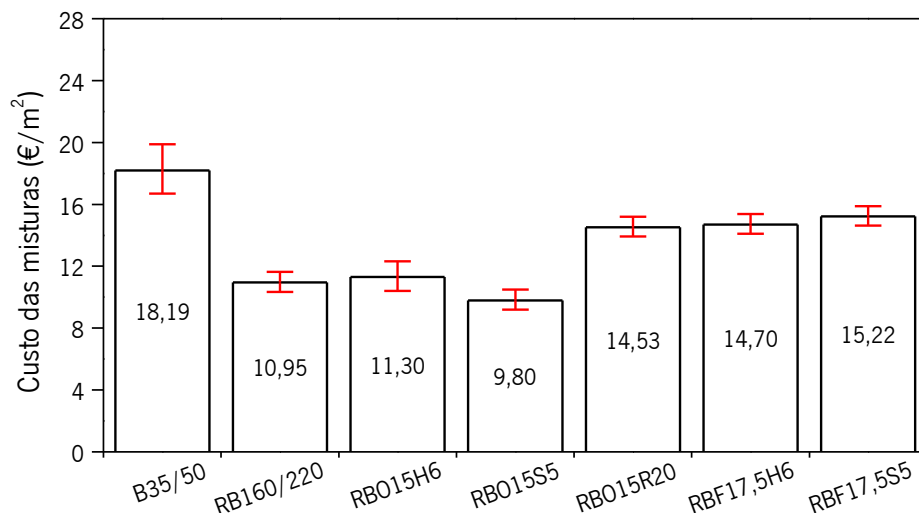


Figura 8.13. Custo da mistura de controlo e das misturas recicladas, em função do betume utilizado, para estruturas “equivalentes” dimensionadas para a classe de tráfego T1.

De facto, todas as misturas recicladas exibem um custo muito inferior ao da mistura de referência sem material fresado e com betume B35/50 (18,19€/m²), independentemente do tipo de betume ou do modificador usado. Até mesmo as misturas com pior desempenho à fadiga, como é o caso das misturas recicladas com betumes modificados com óleo de motor usado e CR (BO15R20) e os betumes modificados com fundo de coluna e HDPE (BF17,5H6) ou SBS (BF17,2S5), tornam-se soluções atrativas a nível económico apesar do aumento de espessuras que acarretam. Este aumento de espessura acaba por ser compensado pelo menor custo do material fresado, reduzindo assim o custo da solução.

Quando se comparam as misturas recicladas entre si, e tendo como mistura de controlo a produzida com betume B160/220, cujo custo é de 10,95€/m², apenas a mistura reciclada com 15% de óleo de motor usado e 5% de SBS apresenta um custo inferior (9,80€/m²). O excelente desempenho deste betume modificado com resíduos permite uma redução da espessura das camadas betuminosas comparativamente à estrutura com betume RB160/220 e, conseqüentemente, uma redução do custo final das misturas aplicadas nesse pavimento, apesar do elevado custo desse betume modificado. Pelas mesmas razões, a mistura com o betume RBO15H6, modificada com óleo de motor usado e HDPE, também apresentou um custo próximo da mistura de controlo. As restantes misturas recicladas com betumes modificados com resíduos (RBO15R20, RBF17,5H6 e RBF17,5S5) apresentam custos mais elevados e bastante similares entre si (14,53, 14,70 e 15,22€/m², respetivamente).

Relativamente ao efeito que a variação do custo das misturas SMA tem no custo final de cada mistura (barras de erro), verifica-se que em média essa variabilidade é de 1,39€/m² nas misturas recicladas, que corresponde a metade da variação observada na mistura de referência com betume B35/50. O menor impacto desta variação nas misturas recicladas resulta da utilização do material fresado, cujo custo não é influenciado nesta análise de sensibilidade.

Por último, verificou-se que o custo das misturas recicladas com fundo de coluna é claramente mais elevado do que as misturas com os mesmos polímeros e óleo de motor usado. O tipo de polímero teve menos influência no custo, mas o SBS foi a melhor solução.

No que concerne aos custos das misturas aplicadas em pavimentos dimensionados para uma classe de tráfego T3 (Figura 8.14), mais uma vez os custos das misturas recicladas são claramente inferiores (em média 6,63€/m²) ao custo da mistura de referência sem material fresado e com betume B35/50 (16,99€/m²). Tendo em conta que as várias estruturas de pavimento foram dimensionadas para terem um desempenho semelhante entre si, as misturas com os betumes RB15H6 (8,56€/m²) e RB15S5 (8,68€/m²) apresentam-se como as soluções economicamente mais vantajosas, proporcionando uma redução de mais de 50% do custo em relação à mistura de referência (B35/50).

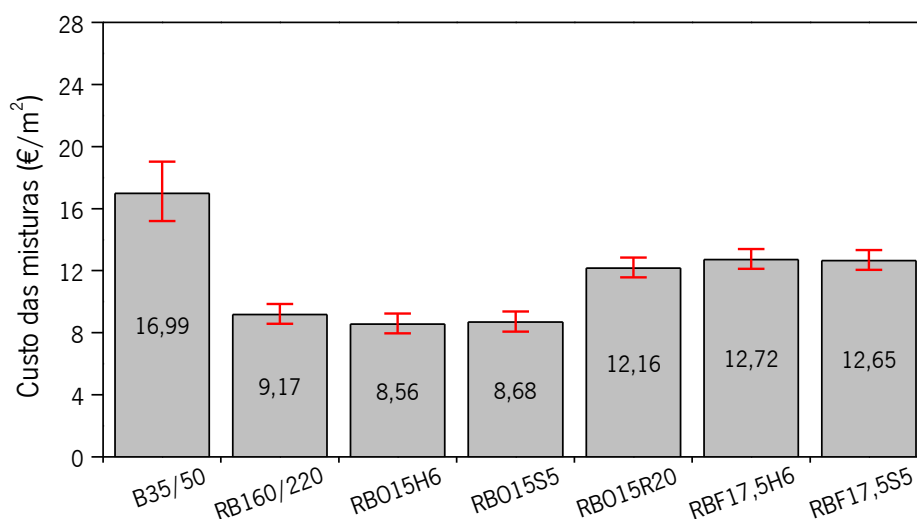


Figura 8.14. Custo da mistura de controlo e das misturas recicladas, em função do betume utilizado, para estruturas “equivalentes” dimensionadas para a classe de tráfego T3

Os custos das misturas recicladas com os betumes modificados com resíduos também foram comparados com o custo da mistura reciclada com o betume de controlo RB160/220 (9,17€/m²). Nesse

caso, verifica-se que apenas as misturas com óleo de motor usado e HDPE ou SBS exibem custos inferiores a essa mistura reciclada de controlo.

As restantes misturas recicladas com os betumes RB15R20, RBF17,5H6 e RBF17,5S5 apresentam custos muito próximos (12,16€/m², 12,72€/m² e 12,65€/m², respetivamente), uma vez que as suas estruturas também exibem espessuras muito semelhantes. Apesar dessas misturas terem um custo superior à mistura reciclada de controlo (RB160/220), ainda proporcionam uma redução média de 26% em relação ao custo da mistura sem material fresado e com betume B35/50.

A variação do custo máximo e mínimo das misturas recicladas, associada à incerteza sobre o custo das misturas SMA, é de 1,28€/m² (barras de erro), que é 2,9 vezes inferior à variação da mistura de referência com betume B35/50. Assim, para este nível de tráfego intermédio confirma-se que a variação do custo das misturas SMA não tem um grande impacto no custo das misturas recicladas. De novo, constata-se que o custo das misturas recicladas com fundo de coluna é mais elevado do que as misturas com os mesmos polímeros e óleo de motor usado. Assim, o tipo de polímero teve pouca influência no custo.

A análise económica permitiu assim aferir uma das componentes mais importantes para a seleção do tipo de betume e misturas a utilizar aquando da realização de um projeto de infraestruturas rodoviárias, ou seja, o seu custo. Apesar do desempenho mecânico ser muitas vezes superior ao das misturas convencionais, o elevado custo da utilização de alguns betumes modificados pode afetar a sua seleção. Neste estudo verifica-se que as misturas recicladas apresentam os melhores resultados ao nível económico, obtendo-se misturas com elevadas taxas de reciclagem e cujo custo pode ser cerca de metade de uma mistura convencional.

No caso das misturas sem material fresado, a utilização de betume modificado com HDPE origina custos inferiores aos da mistura de referência com betume convencional B35/50, e ao mesmo tempo permite utilizar entre 16% (BO10H6) e 21% (BF15H6) de resíduos na sua constituição. Para além disso, as misturas com os betumes modificados com fundo de coluna e HDPE ou SBS ainda têm custos inferiores aos da mistura produzida com o betume modificado comercial (PMB45/80), e podem ser soluções promissoras e amigas do ambiente para substituir os betumes modificados comerciais.

8.3. Análise ambiental

Para além do desempenho mecânico, também é crucial avaliar a aplicação destas misturas com resíduos a nível ambiental. Isto deve-se ao facto destas novas misturas serem constituídas por resíduos cujos lixiviados provenientes das mesmas podem contaminar solos e cursos de água, afetando ecossistemas, e apresentar riscos para a saúde humana.

Por outro lado, as emissões gasosas com efeito de estufa resultantes do tipo de mistura selecionada para as estruturas de pavimentos consideradas poderão influenciar a decisão sobre a alternativa de pavimentação mais sustentável.

Assim, a avaliação do impacto ambiental destas novas soluções foi realizada determinando a presença de metais pesados nos eluatos resultantes do ensaio de lixiviação, de acordo com a norma EN 12457-4: 2002, e avaliando as emissões de dióxido de carbono (CO₂) das diferentes misturas desde a obtenção dos materiais até ao transporte para obra.

8.3.1. Avaliação dos lixiviados das misturas consideradas em camadas de desgaste

Numa primeira fase, o ensaio de lixiviação consiste na secagem da amostra numa estufa até a massa da amostra permanecer constante, para garantir que não existe água na mesma. Em seguida, uma amostra de mistura betuminosa com cerca de 90 g, com dimensão inferior a 10 mm é colocada num recipiente fechado com cerca de 900 ml de água destilada. Esta mistura é colocada durante 24 horas numa máquina giratória (garantindo a passagem constante da água pela amostra). Após as 24 horas, realiza-se uma primeira filtragem com papel de filtro para remoção da matéria de maior dimensão, seguindo-se uma segunda filtragem com recurso a vácuo para remoção da matéria de menor dimensão, obtendo-se o denominado eluato (Figura 8.15).

Após o processo de filtragem, procedeu-se à medição da condutividade e do pH do eluato, exigida na norma. Em seguida, o eluato foi analisado através do ensaio de espectroscopia de absorção atómica para quantificação dos metais pesados, tendo em conta os valores limites de lixiviação impostos no Decreto-Lei n.º 183/2009, Anexo IV, Parte B.

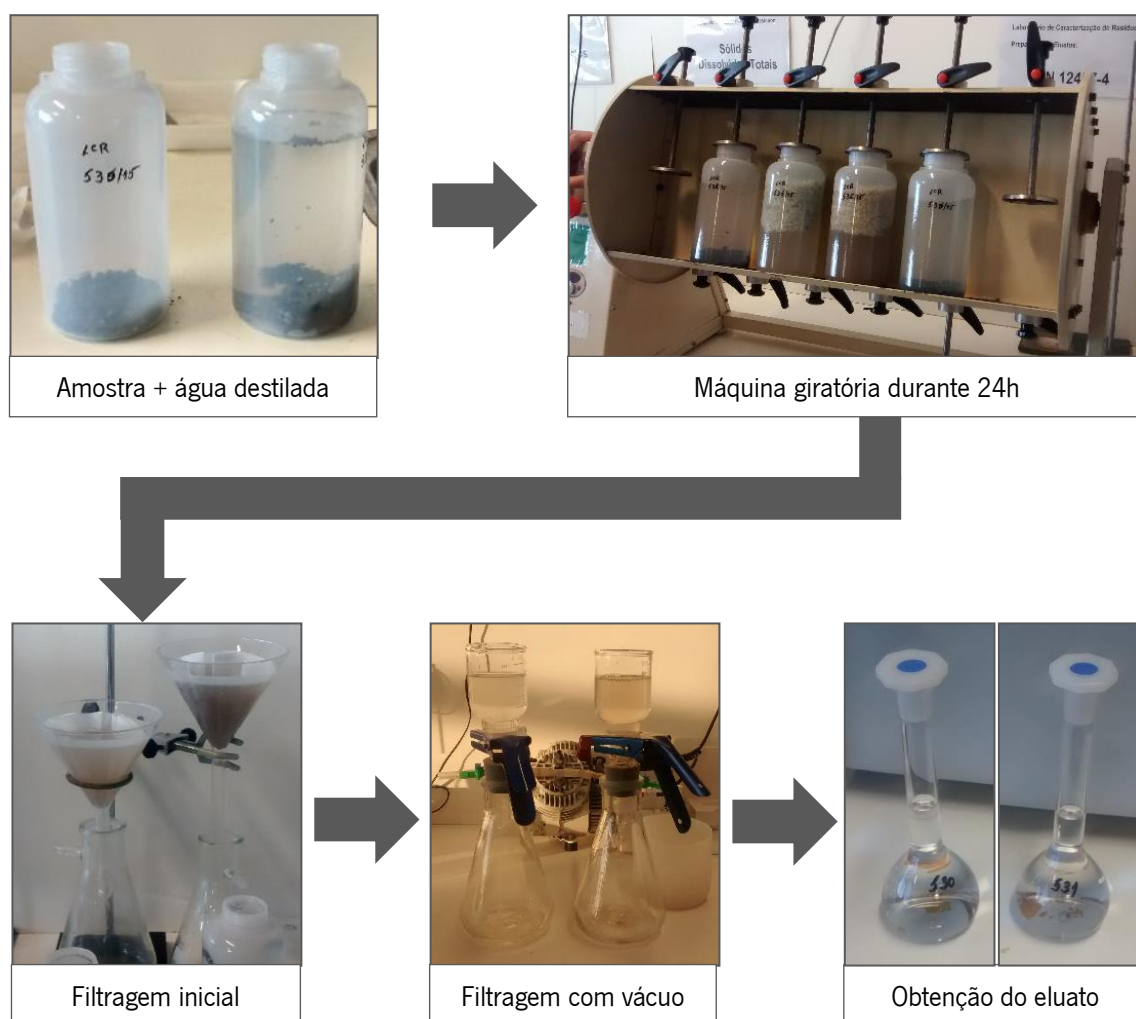


Figura 8.15. Processo de obtenção do eluato para análise de metais pesados.

A utilização de resíduos nas misturas betuminosas pode acarretar riscos adicionais para o ambiente e saúde humana, tal como mencionado anteriormente. Como tal, é necessário identificar e quantificar a presença de metais pesados resultantes da lixiviação das misturas em análise e comparar os valores obtidos com os limites especificados pelo Decreto-Lei n.º 183/2009, Anexo IV, Parte B. Os metais pesados avaliados neste estudo e também especificados no referido Decreto-Lei são os seguintes: cádmio, crómio, cobre, níquel, chumbo e zinco. Estes metais pesados em análise estão associados a escorrências provenientes da circulação de automóveis em estradas, ou seja, escorrências que tiveram contacto com o pavimento (Ramísio, 2007)

Assim, através da análise química dos eluatos resultantes do ensaio de lixiviação das misturas em estudo (Quadro 8.3) é possível verificar que as misturas de controlo, bem como as misturas com óleo de motor e polímeros cumprem os limites máximos impostos para todos os metais pesados em estudo. Importa realçar que quando os resultados aparecem com o símbolo de inferior (<) indica que o próprio

equipamento não permite quantificar a presença desses metais pesados com mais precisão, por se tratar de um valor inferior ao limite de quantificação desse parâmetro, pelo método indicado.

Quadro 8.3. Quantidade de metais pesados nos eluatos das misturas de controlo e das misturas com óleo de motor usado e polímeros.

Metal pesado	Limites (mg/kg)	Misturas SMA				
		B35/50+F	PMB45/80	BO10H6	BO10S5	BO7,5R20
Cádmio	0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
Crómio	0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Cobre	2,00	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25
Níquel	0,40	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30
Chumbo	0,50	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30
Zinco	4,00	0,43	0,57	0,14	0,49	0,24

Quando se compara a presença de metais pesados nos eluatos das misturas referidas pode observar-se que a presença de zinco é mais elevada na mistura de controlo SMA-PMB45/80 do que nas restantes misturas. Nas misturas com óleo de motor e polímeros, a maior concentração de zinco foi obtida na mistura com óleo e SBS (SMA-BO10S5). No caso das misturas com óleo e HDPE ou borracha, apesar de serem constituídas por maiores quantidades de resíduos, estas apresentam baixas concentrações de metais pesados (i.e. zinco). De facto, a concentração de zinco na mistura de controlo com betume convencional e fibras é superior à concentração de zinco das misturas SMA-BO10H6 e SMA-BO7,5R20.

Relativamente à análise das misturas com fundo de coluna e polímeros verifica-se, tal como nas misturas anteriores, uma maior concentração de zinco na mistura de controlo SMA-PMB45/80 (Quadro 8.4). Por sua vez, de entre as misturas com resíduos, a mistura com fundo de coluna e borracha (SMA-BF15R20) foi a que apresentou a maior concentração de zinco, que poderá estar relacionado com a elevada quantidade de resíduos utilizados na sua constituição (15% de fundo de coluna e 20% de borracha). As restantes misturas, nomeadamente as misturas SMA-BF15H6 e SMA-BF12,5S5, exibem concentrações de zinco inferiores à mistura de controlo com betume convencional e fibras, porém maior concentração de cobre do que as duas misturas de controlo.

Quando comparadas entre si, essas misturas com fundo de coluna e polímeros (SMA-BF15H6 e SMA-BF12,5S5) apresentam maior concentração de cobre do que as misturas com óleo de motor usado

e polímeros. No caso da mistura com fundo de coluna e borracha não é possível verificar se ocorreu aumento devido à limitação de precisão do equipamento, uma vez que em ambos os casos o valor fornecido foi de $<0,25$.

No que concerne à concentração de zinco, as misturas com fundo de coluna também exibem maior concentração do que as misturas com óleo. Estes aumentos de concentração podem estar relacionados com dois principais motivos. O primeiro com a própria alteração do substituto parcial de óleo para fundo de coluna, uma vez que o fundo de coluna apresenta maior concentração de ambos metais pesados comparativamente ao óleo de motor usado. O segundo motivo poderá estar relacionado com o aumento da sua quantidade de 10% para 15%, no caso do betume com HDPE, ou de 7,5% para 15%, no caso da borracha. Contudo, o mesmo comportamento não se verifica na mistura com betume modificado com fundo de coluna e SBS (SMA-BF12,5S5) onde ocorreu uma redução da concentração de zinco.

Quadro 8.4. Quantidade de metais pesados nos eluatos das misturas de controlo e das misturas com fundo de coluna e polímeros.

Metal pesado	Limites (mg/kg)	Misturas SMA				
		B35/50+F	PMB45/80	BF15H6	BF12,5S5	BF15R20
Cádmio	0,04	$<0,04$	$<0,04$	$<0,04$	$<0,04$	$<0,04$
Crómio	0,50	$<0,50$	$<0,50$	$<0,50$	$<0,50$	$<0,50$
Cobre	2,00	$<0,25$	$<0,25$	0,31	0,25	$<0,25$
Níquel	0,40	$<0,30$	$<0,30$	$<0,30$	$<0,30$	$<0,30$
Chumbo	0,50	$<0,30$	$<0,30$	$<0,30$	$<0,30$	$<0,30$
Zinco	4,00	0,43	0,57	0,17	0,29	0,45

Relativamente às misturas recicladas verifica-se que parte dos agregados e do betume advêm do material fresado, material este proveniente de estradas degradadas e/ou em fim de vida útil. Como tal, é possível que este material contenha maiores concentrações de metais pesados devido à contaminação a que esteve sujeito durante o seu tempo de serviço.

De acordo com os resultados do Quadro 8.5, o material fresado cumpre todos os valores máximos requeridos para os metais pesados em estudo. No entanto, comparando os valores obtidos com os das misturas de controlo (SMA-B35/50+F e SMA-PMB45/80) verifica-se uma maior concentração de zinco e níquel no material fresado. Estes resultados vêm confirmar o facto do material fresado apresentar

maiores concentrações de metais pesados devido às contaminações (e.g. originadas por desgaste dos pneus, desgaste de sistemas de travagem, acumulação de combustíveis e óleos de motor na superfície) a que esteve sujeito durante o seu tempo de serviço.

Quadro 8.5. Quantidade de metais pesados nos eluatos do material fresado.

Metal pesado	Limites (mg/kg)	Material Fresado
Cádmio	0,04	<0,04
Crómio	0,50	<0,50
Cobre	2,00	<0,25
Níquel	0,40	0,30
Chumbo	0,50	<0,30
Zinco	4,00	0,79

Quando se avalia as misturas recicladas com óleo de motor e polímeros (Quadro 8.6) verifica-se que, apesar de apresentarem elevadas percentagens de resíduos na sua constituição, cumprem os requisitos exigidos por lei para os metais pesados em análise. Para além disso, pode constatar-se que estas misturas apresentam valores de cobre e zinco superiores à mistura de controlo (SMA-RB160/220+F) o que poderá dever-se à utilização de elevadas quantidades de óleo e/ou tipo de polímero utilizados nos betumes modificados com resíduos. Apenas a mistura reciclada com óleo de motor e HDPE apresenta concentrações de cobre inferiores à da mistura reciclada de controlo.

Quadro 8.6. Quantidade de metais pesados nos eluatos da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com óleo de motor e polímeros.

Metal pesado	Limites (mg/kg)	Misturas recicladas SMA			
		RB160/220+F	RB015H6	RB015S5	RB015R20
Cádmio	0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
Crómio	0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Cobre	2,00	0,26	<0,25	0,31	0,27
Níquel	0,40	<0,30	<0,30	<0,30	0,40
Chumbo	0,50	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30
Zinco	4,00	0,37	0,41	0,39	0,66

No que diz respeito às misturas recicladas com fundo de coluna e polímeros, tal como em todas as misturas em análise neste estudo, estas apresentam concentrações dos metais pesados em análise inferiores aos requisitos exigidos por lei (Quadro 8.7). Aliado a isso, estas misturas exibem menores concentrações de zinco do que a mistura convencional, embora apresentem maiores concentrações de cobre (com exceção da mistura reciclada com fundo de coluna e borracha). Comparativamente às misturas recicladas com óleo de motor e resíduos ocorreu um aumento da concentração de cobre para as misturas RBF17,5H6 e RBF17,5S5, mas ao mesmo tempo ocorreu uma redução da concentração de zinco em todas as misturas com fundo de coluna e polímeros. Esta redução de zinco poderá estar relacionada com uma maior interação do fundo de coluna com o betume envelhecido contido no material fresado, reduzindo assim a elevada concentração deste metal.

Quadro 8.7. Quantidade de metais pesados nos eluatos da mistura reciclada de controlo e das misturas recicladas com fundo de coluna e polímeros.

Metal pesado	Limites (mg/kg)	Misturas recicladas SMA			
		RB160/220+F	RBF17,5H6	RBF17,5S5	RBF22,5R20
Cádmio	0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
Crómio	0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Cobre	2,00	0,26	0,42	0,40	<0,25
Níquel	0,40	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30
Chumbo	0,50	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30
Zinco	4,00	0,37	<0,05	<0,05	<0,05

Comparativamente ao material fresado é possível verificar que as misturas recicladas com resíduos, assim como a mistura reciclada de controlo apresentam valores de níquel inferiores. Como estas misturas são uma combinação de 50% de material fresado e 50% de agregado novos e betume não envelhecido, a concentração de níquel pode acabar dispersa contribuindo para a redução do seu valor. Por outro lado, essa redução poderá dever-se ao facto de o betume novo adicionado envolver as partículas de fresado, retendo os metais pesados no seu interior. O mesmo se verifica no caso do zinco, onde a concentração do mesmo é muito superior no material fresado do que nestas misturas.

Consequentemente pode partir-se do princípio que as misturas desenvolvidas neste estudo com betumes modificados com resíduos não apresentam risco, quer para a saúde humana, quer para o meio ambiente,

uma vez que cumprem os valores máximos requeridos para os metais pesados em análise, tendo por base a legislação aplicável.

8.3.2. Avaliação das emissões gasosas com efeito de estufa

De acordo com Yang *et al.* (2015) o sector da indústria rodoviária tem um elevado impacto no ambiente, devido à produção de gases com efeito de estufa, nomeadamente, as emissões de CO₂ (ou CO₂-equivalente obtidas pela conversão da quantidade de emissões de outros gases em emissões de CO₂, através do seu potencial de aquecimento global). A elevada procura de materiais de origem petrolífera juntamente com a elevada pegada ambiental dos mesmos tem levado à necessidade de adotar estratégias e práticas mais sustentáveis que aliem as exigências da indústria da pavimentação com a redução do impacto ambiental.

Nesse sentido, a utilização de resíduos na produção das misturas (e.g. material fresado, borracha de pneus usados, entre outros) permitem reduzir a quantidade de recursos naturais a usar, reduzindo a extração e a deposição dos resíduos em aterro. Contudo, a utilização do material fresado, por exemplo, devido ao facto de necessitar de aquecimento extra e, consequentemente maiores gastos energéticos, tem de ser avaliada de modo a perceber se as vantagens ambientais que acarretam são ou não benéficas para o ambiente (Thives e Ghisi, 2017).

Assim, como nas misturas em análise se tentou reduzir a quantidade de betume convencional através da substituição parcial do mesmo por óleo de motor usado ou fundo de coluna, assim como a utilização de resíduos poliméricos e, em alguns dos casos o uso de material fresado, achou-se conveniente verificar se as vantagens ambientais da utilização destes diferentes resíduos culminam em menores emissões de CO₂-equivalente.

A análise de emissões de CO₂-equivalente deste estudo contempla as seguintes etapas: i) produção dos diferentes materiais utilizados na produção das misturas em análise e o seu transporte até à central; ii) produção das misturas tendo em conta as temperaturas de produção das misturas e de aquecimento dos agregados; e, iii) transporte até ao local da obra.

No que diz respeito às quantidades de CO₂-equivalente por unidade de massa de material (kg CO₂-equiv./kg) utilizados para a produção dos diferentes materiais (M), estes podem ser consultados no Quadro 8.8.

Quadro 8.8. Valores de kg CO₂-equiv./kg para a produção dos diferentes materiais.

Materiais	kg CO ₂ -equiv./kg
Agregados	0,00260 (White <i>et al.</i> , 2010)
Betume	0,42600 (White <i>et al.</i> , 2010)
Betume modificado comercial	0,49481 (Mukherjee, 2016)
Polímeros	
- CR	0,01260 (White <i>et al.</i> , 2010)
- HDPE	0,01260
- SBS	0,10461 (Mukherjee, 2016)
Fibras	0,10461
Material fresado	0,00013 (Valle <i>et al.</i> , 2017)

Importa salientar que foram usados alguns pressupostos, nomeadamente o facto de as emissões provocadas na “produção” do óleo de motor usado e do fundo de coluna serem consideradas nulas, isto porque são resíduos que não sofreram nenhum tratamento para serem usados na modificação do betume. Outro pressuposto adotado está relacionado com o valor de kg CO₂-equiv./kg do resíduo HDPE, cujo valor escolhido foi igual ao da borracha, uma vez que ambos são resíduos que são sujeitos a um processo de separação e moagem e cujas emissões podem ser consideradas semelhantes. No que diz respeito ao valor de kg CO₂-equiv./kg do SBS este foi obtido considerando que a sua emissão corresponde à diferença entre as emissões do betume modificado comercial e do betume convencional usado no estudo de Mukherjee (2016). É ainda de referir que o mesmo valor foi adotado para as fibras, visto tratar-se de polímeros virgens em ambos os casos.

De forma a contabilizar os valores de kg CO₂-equiv./kg do transporte dos materiais necessários para a produção das misturas em estudo e do transporte das próprias misturas para obra (T), que de acordo com (White *et al.*, 2010) é 0,0002821 kg CO₂-equiv./kg·km, é necessário definir as distâncias (d) dos mesmos até ao local de produção da mistura (central).

Como tal, optou-se por estudar 3 cenários distintos de modo a contemplar diferentes situações que possam ocorrer aquando da construção de um pavimento (Quadro 8.9).

O primeiro cenário corresponde a uma situação similar à cidade de Guimarães, cuja distância de alguns materiais, como o caso do betume e polímeros é referente à distância Guimarães-Porto e as restantes distâncias são distâncias médias que abrangem as cidades mais próximas. Por sua vez, no cenário II considerou-se que a central de produção de misturas betuminosas está localizada na pedreira, levando a que a distância de transporte entre o local de extração dos agregados (pedreira) e a central de produção seja nula, mantendo-se as restantes distâncias dos materiais. No último cenário (III), ampliou-se em três vezes as distâncias do cenário I, de modo a avaliar uma situação mais desfavorável e que pode ocorrer em zonas do interior de Portugal. A distância da central ao local de obra é igual no cenário I e II, nomeadamente, uma distância de 30 km e no cenário III considerou-se uma distância de 90 km.

Quadro 8.9. Distâncias dos materiais até à central e da central ao local de obra, em km.

Misturas	Cenário I	Cenário II	Cenário III
Agregados	20	0	60
Betume	50	50	150
Polímeros	50	50	150
Fibras	50	50	150
Material fresado	30	30	90
Local da Obra	30	30	90

O procedimento de cálculo para a obtenção das emissões de CO₂-equivalente (em kg CO₂-equiv./kg), apresentado em seguida, aplica-se a qualquer a mistura, tendo sido efetuado para as diferentes misturas em estudo (SMA e AC20). O cálculo de kg CO₂-equiv./kg dos materiais ($M_{\text{materiais}}$) utilizados para a produção de uma mistura betuminosa, bem como o transporte dos mesmos até à central ($T_{\text{materiais}}$), podem ser obtido através da Equação 8.2 e Equação 8.3, respetivamente:

$$M_{\text{materiais}} = \sum \% \text{ do material na mistura}_i \times M_i \quad (8.2)$$

$$T_{\text{materiais}} = \sum \% \text{ do material na mistura}_i \times T \times d_i \quad (8.3)$$

Em que,

$M_{\text{materiais}}$ é o valor total de CO_2 -equivalente dos diferentes materiais utilizados para a produção da mistura ($\text{kg CO}_2\text{-equiv./kg}$);

M_i é o valor de CO_2 -equivalente da produção do material i ($\text{kg CO}_2\text{-equiv./kg}$);

T_{material} é o valor total de CO_2 -equivalente do transporte dos materiais para a produção da mistura ($\text{kg CO}_2\text{-equiv./kg}$);

T é o valor de CO_2 -equivalente do transporte do material ou mistura ($\text{kg CO}_2\text{-equiv./kg km}$); e,

d_i é a distância do material i à central (km).

O Quadro 8.10 mostra os valores de CO_2 -equivalente considerados para a produção das diferentes misturas (P_{mistura}). Neste quadro, considerou-se que as emissões resultantes da produção das misturas com betumes modificados com resíduos são iguais aos apresentados no estudo de White *et al.* (2010) para as misturas com betume borracha. No caso das misturas com material fresado (RAP) devido ao aumento de temperatura necessário para sobreaquecer parte dos agregados (uma vez que outra parte, nomeadamente 25% entram a frio), os valores de CO_2 -equivalente foram obtidos através de relações lineares com os valores estipulados na literatura, tendo em conta as temperaturas de produção a obter. Para além disso, os valores de CO_2 -equivalente considerados para a produção das misturas com RAP devem ser multiplicados pela percentagem de material que efetivamente é necessário aquecer, isto é, a percentagem correspondente ao agregado novo e à fração grossa do material fresado.

Quadro 8.10. Valores de $\text{kg CO}_2\text{-equiv./kg}$ resultantes da produção das diferentes misturas.

Misturas	$\text{kg CO}_2\text{-equiv./kg}$
Mistura convencional	0,0663 (White <i>et al.</i> , 2010)
Mistura com betume borracha	0,0723 (White <i>et al.</i> , 2010)
Mistura com RAP	
- Betume convencional	0,0746
- Betumes modificados com HDPE e SBS	0,0844
- Betume modificado com CR	0,0803

Por último, importa ainda considerar as emissões relativas ao transporte das misturas para o local de obra (T_{mistura}) que foram obtidas através da multiplicação do valor de CO_2 -equivalente do transporte do material (T) pela distância da central ao local de obra (Quadro 8.9), tal como demonstra a Equação 8.4.

$$T_{\text{mistura}} = T \times d_{\text{central à obra}} \quad (8.4)$$

Em que,

T_{mistura} é o valor total de CO₂-equivalente do transporte da mistura da central à obra (kg CO₂-equiv./kg);

T é o valor de CO₂-equivalente do transporte do material ou mistura (kg CO₂-equiv./kg km); e,

$d_{\text{central à obra}}$ é a distância da central à obra (km).

Assim, as emissões das misturas produzidas para cada mistura em estudo, tendo em conta as diferentes etapas contabilizadas anteriormente, podem ser obtidas através da Equação 8.5:

$$\text{Emissões} = M_{\text{material}} + T_{\text{material}} + P_{\text{mistura}} + T_{\text{mistura}} \quad (8.5)$$

A título de exemplo, na Figura 8.16 podem ser observados os valores das emissões de CO₂-equivalente das misturas betuminosas do tipo SMA produzidas com os betumes de controlo e com os betumes modificados com resíduos do cenário I, assim como a variação das emissões tendo em conta os cenários II e III (barra de erro a azul e a vermelho, respetivamente). Estes resultados permitem ter uma perceção do efeito das diferentes etapas nas emissões de CO₂ dessa mistura. Não se apresentam os resultados das misturas AC 20, dado que a proporção das emissões das diferentes etapas era semelhante à da mistura SMA, variando apenas na produção dos materiais.

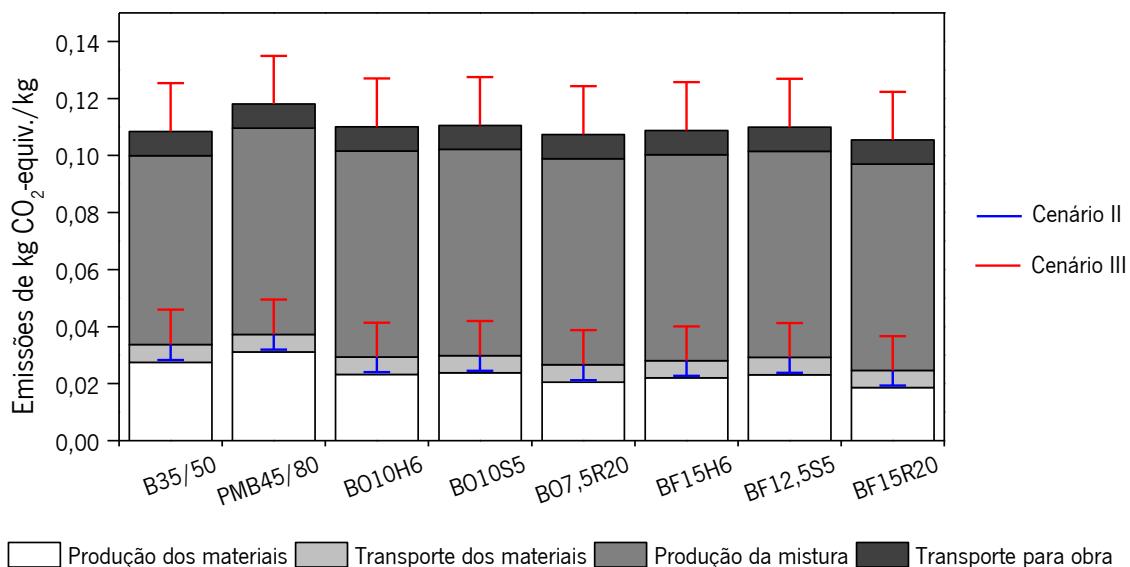


Figura 8.16. Emissões de CO₂-equivalente das misturas betuminosas do tipo SMA tendo em conta o tipo de betume utilizado para os diferentes cenários.

Da análise da Figura 8.16 é possível constatar que a mistura produzida com o betume modificado comercial PMB45/80 apresenta as emissões mais elevadas de CO₂-equivalente (0,118 kg CO₂-equiv./kg), o que poderá dever-se à emissão de CO₂-equivalente da produção do betume modificado que é superior à do betume convencional.

Para além disso verifica-se que as misturas produzidas com betume modificado com borracha exibem valores mais baixos de CO₂-equivalente (para o betume BF15R20 o valor é de 0,105 kg CO₂-equiv./kg e para o betume B07,5R20 o valor é de 0,107 kg CO₂-equiv./kg) do que as das misturas produzidas com o betume de controlo B35/50 (0,108 kg CO₂-equiv./kg). O facto de se utilizarem elevadas percentagens de borracha (20%) cuja emissão de CO₂-equivalente é bastante inferior à do betume convencional faz com que a emissão das misturas com estes betumes, mesmo com o aumento da temperatura na fase de produção da mistura, atinja valores de CO₂-equivalente iguais ou até inferiores às misturas de controlo com betume B35/50

Pode ainda constatar-se que as misturas com HDPE exibem valores de CO₂-equivalente (0,110 kg CO₂-equiv./kg e 0,109 kg CO₂-equiv./kg) superiores aos das misturas de controlo com betume B35/50 mas inferiores aos das misturas com SBS (0,111 kg CO₂-equiv./kg e 0,110 kg CO₂-equiv./kg), o que poderá dever-se a dois principais fatores. O primeiro está relacionado com a maior quantidade de polímero usado (ainda que seja só mais 1%, este provoca uma redução das emissões associadas à utilização do betume convencional) e o segundo relaciona-se com o facto de o valor de emissão de CO₂-equivalente do resíduo HDPE ser inferior à do polímero virgem SBS. Importa ainda salientar que as misturas com betumes modificados com fundo de coluna exibem menores emissões de CO₂-equivalente, devido ao facto de diminuírem entre 2,5% a 7,5% as emissões de CO₂-equivalente provenientes do betume convencional, comparativamente às misturas betuminosas com betume modificado com óleo de motor usado.

Pode ainda verificar-se que embora as emissões resultantes da produção das misturas betuminosas tenham um peso significativo nas emissões finais (emissões mais elevadas), estas são iguais em todas as misturas com betume modificado, assim como as emissões do transporte para local de obra. Deste modo, a maior variação está relacionada precisamente com as emissões de produção dos materiais, onde a presença de resíduos diminui as emissões de CO₂-equivalente.

No que diz respeito à variação provocada pela localização da central na pedreira (cenário II) comparativamente ao cenário I, constata-se que as emissões relativas ao transporte dos materiais se torna praticamente inexistente, o que poderá estar relacionado com o facto de os agregados corresponderem a 94,2% ou 95,2% do peso das misturas SMA14 e AC20, respetivamente. Aliado a isso, o aumento das distâncias para o triplo (cenário III) faz com que o aumento de emissões seja em média de 0,029 kg CO₂-equiv./kg sendo que para as distâncias estudadas as tendências de emissões finais se continuam a verificar.

No caso das misturas recicladas, como se pode observar na Figura 8.17, quando comparadas com a mistura de controlo com betume B35/50 sem material fresado, estas apresentam menores emissões de CO₂-equivalente apesar do aumento de temperatura necessário durante a fase de produção das mesmas. Os valores mais baixos de emissões na produção dos materiais estão relacionados com a substituição de 50% dos agregados novos por material fresado que, por se tratar de um resíduo, exhibe valores de emissões de CO₂-equivalente muito mais reduzidos do que os dos agregados (cerca de 50%).

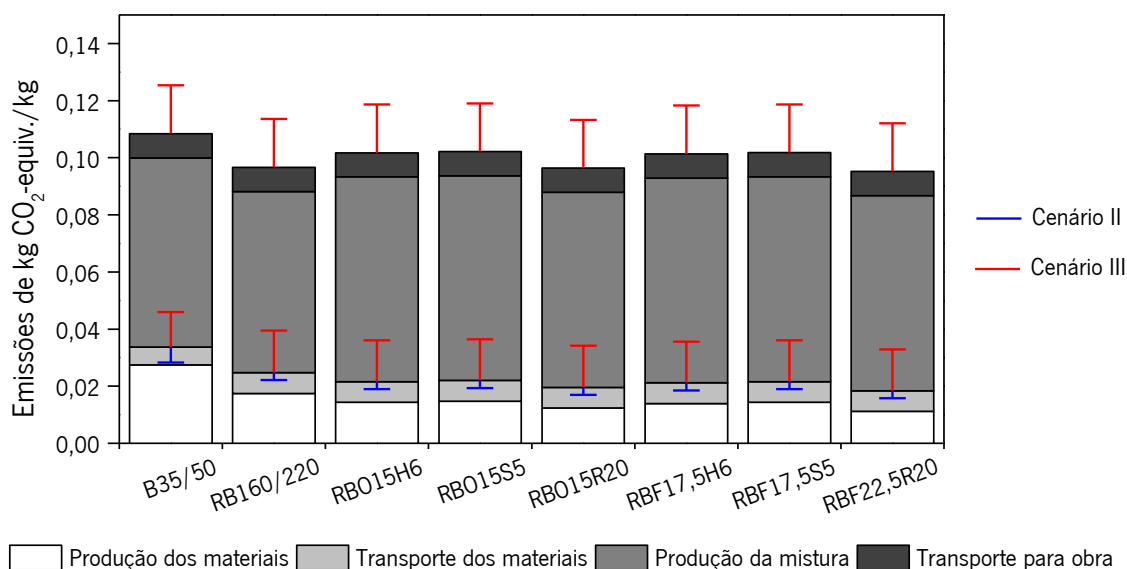


Figura 8.17. Emissões de CO₂-equivalente da mistura de controlo sem material fresado e das misturas recicladas do tipo SMA tendo em conta o betume utilizado para os diferentes cenários.

Para além disso, verifica-se mais uma vez que as misturas recicladas com betume modificado com borracha (0,096 kg CO₂-equiv./kg e 0,095 kg CO₂-equiv./kg) e com betume convencional B160/220 (0,097 kg CO₂-equiv./kg) exibem as menores emissões, seguindo-se as misturas com HDPE (0,102 kg CO₂-equiv./kg e 0,101 kg CO₂-equiv./kg) e SBS (0,102 kg CO₂-equiv./kg). Neste tipo de

misturas a influência da presença do fundo de coluna não é tão notória como nas misturas sem material fresado, o que pode ser explicado pelo facto de apenas uma parte do betume final da mistura resultar da introdução de betume modificado com resíduos, pois o material fresado já contém betume envelhecido.

Quando se alteram os cenários de estudo constata-se que a localização da pedreira na central não reduz de forma tão acentuada as emissões do transporte de materiais como nas misturas sem material fresado. Ainda que utilizado em menor percentagem comparativamente à quantidade total de agregado que é necessário nas misturas sem material fresado, o material fresado tem que ser transportado para a central, daí a menor redução das emissões. Contudo, mesmo não sendo necessário transportar a totalidade dos agregados e, as misturas com betume convencional B35/50 praticamente não apresentarem emissões quanto ao transporte de materiais, estas ainda exibem maiores emissões do que as misturas recicladas. No caso do cenário III pode verificar-se que as emissões, tal como seria de esperar devido ao aumento das distâncias dos materiais e do local de obra, aumentam em média 0,031 kg CO₂-equiv./kg.

Pode assim concluir-se que as misturas recicladas exibem as menores emissões de CO₂-equivalente o que se deve à utilização de material fresado que substitui parcialmente os agregados naturais e reduz a necessidade de introduzir betume novo. No caso das misturas sem material fresado e com betumes modificados com resíduos, as suas emissões ainda que superiores às misturas com betume de controlo B35/50 são inferiores às misturas com betume modificado comercial. Como tal, a utilização de resíduos (óleo de motor usado, fundo de coluna e polímeros) na modificação dos betumes e a utilização de material fresado contribuem para uma diminuição das emissões de CO₂-equivalente.

Todavia, o desempenho destas misturas quando utilizadas no dimensionamento de pavimentos podem contribuir para uma maior redução ou aumento das emissões de CO₂-equivalente. Como tal, achou-se importante avaliar as emissões das diferentes misturas tendo em conta as estruturas de pavimentos estudadas anteriormente na análise de custos.

Assim, as emissões totais das diferentes estruturas de pavimentos tendo em conta os betumes utilizados na produção das misturas para as diferentes classes de tráfego T1 e T3 podem ser observadas na Figura 8.18a e Figura 8.18b. Estas emissões totais das diferentes estruturas de pavimentos foram obtidas

através da multiplicação das emissões de cada tipo de mistura pela baridade e espessura correspondente.

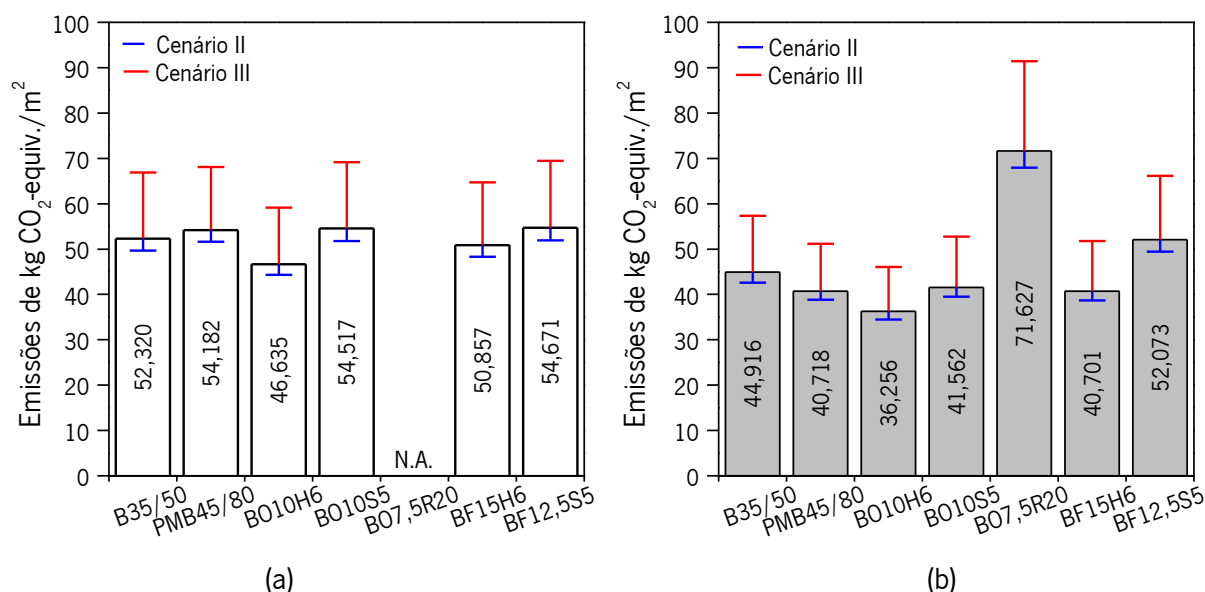


Figura 8.18. Emissões finais de CO₂-equivalente das misturas sem material fresado, em função do betume utilizado para as classes de tráfego (a) T1 e (b) T3.

Apesar das misturas produzidas com borracha exibirem valores de emissões mais baixas quando utilizadas nas estruturas de pavimento, ao não cumprimento dos critérios de ruína (B07,5R20 para a classe T1 e BF15R20 para as duas classes), ou mesmo quando cumprem os critérios (B07,5R20 para a classe de tráfego T3), estas exibem emissões de CO₂-equivalente muito superiores às restantes misturas (cerca de 40%) por serem necessárias maiores espessuras.

Para além disso, verifica-se que as misturas com HDPE exibem as menores emissões (46,635 kg CO₂-equiv./m² e 50,857 kg CO₂-equiv./m²), até mesmo inferiores às da estrutura de pavimento referente ao betume de controlo B35/50 (52,320 kg CO₂-equiv./m²). Neste caso, o facto de estas estruturas apresentarem menores espessuras nas camadas ligadas acarreta benefícios muito positivos no que diz respeito às emissões de CO₂-equivalente.

Por sua vez, as misturas com SBS que anteriormente exibiam emissões inferiores às das misturas produzidas com o betume modificado comercial PMB45/80, quando se considera o seu desempenho mecânico apresentam um aumento das emissões, ainda que ligeiro, comparativamente à estrutura de pavimento referente ao betume PMB45/80. A necessidade de espessuras mais elevadas das misturas

com SBS para cumprirem os critérios de ruína traz consequências negativas nas emissões de CO₂-equivalente.

No entanto, para a classe de tráfego T3, onde não são necessárias espessuras tão elevadas de misturas betuminosas, todas as misturas com exceção das misturas produzidas com os betumes B07,5R20 e BF12,5S5, apresentam valores de CO₂-equivalente inferiores à mistura de controlo com betume B35/50. Mais uma vez se verifica que as misturas produzidas com betumes modificados com HDPE e com óleo de motor ou fundo de coluna exibem os menores valores de emissões (36,256 kg CO₂-equiv./m² e 40,701 kg CO₂-equiv./m², respetivamente).

Importa ainda referir que o cenário II não acarreta variações significativas para as emissões finais das diferentes estruturas. Todavia, o cenário III muito devido ao elevado aumento da distância da central ao local da obra apresenta variações significativas nas emissões totais. Estas variações influenciam muito mais as estruturas relativas à classe de tráfego T1, pois a quantidade de mistura betuminosa necessária é muito superior à da classe de tráfego T3, sendo necessário um maior transporte de mistura da central para obra e, consequentemente maiores emissões.

No que diz respeito às emissões totais das diferentes estruturas de pavimentos tendo em conta os betumes utilizados nas produções das misturas recicladas para as diferentes classes de tráfego T1 e T3, estas podem ser observadas na Figura 8.19a e Figura 8.19b. Apesar de as misturas recicladas exibirem emissões de kg CO₂-equiv./kg inferiores às da mistura com betume B35/50, quando se considera o desempenho das diferentes misturas o mesmo não se verifica para a totalidade das estruturas. Assim, apenas as misturas recicladas produzidas com betume B160/220 e com os betumes modificados B015H6 e B015S5 exibem emissões inferiores às da mistura sem material fresado, quer para a classe de tráfego T1, quer para a classe de tráfego T3.

Para além disso, pode ainda verificar-se que as misturas recicladas que exibem as menores emissões de CO₂-equivalente para os níveis de tráfego T1 e T3 são as misturas recicladas com betume modificado B015H6 (42,607 e 33,118 kg CO₂-equiv./m², respetivamente) e B015S5 (36,254 e 31,438 kg CO₂-equiv./m², respetivamente) uma vez que apresentam espessuras de pavimento muito inferiores comparativamente às restantes estruturas de pavimento.

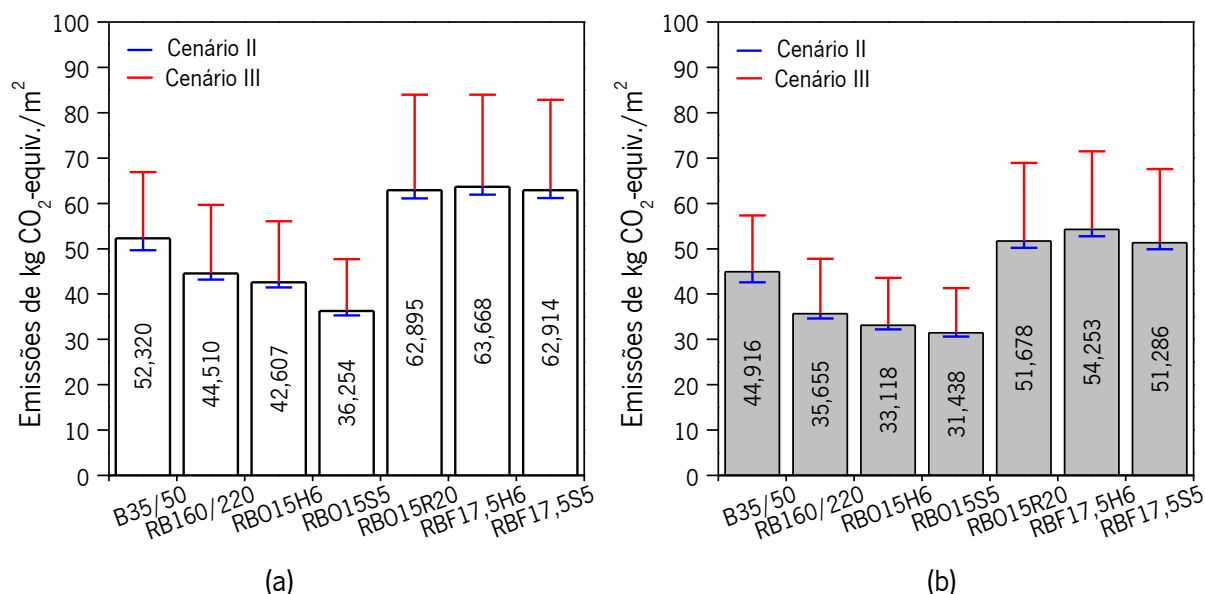


Figura 8.19. Emissões finais de CO₂-equivalente da mistura de controlo sem material fresado e das misturas recicladas, em função do betume utilizado para as classes de tráfego (a) T1 e (b) T3.

O menor desempenho à fadiga das misturas recicladas com betumes modificados com fundo de coluna e HDPE ou SBS, bem como, da mistura reciclada com betume modificado com óleo de motor usado e CR, contribuem para a necessidade de maiores espessuras de camadas betuminosas, conduzindo a maiores quantidades de mistura transportadas para a obra, logo maiores emissões de CO₂-equivalente. Apesar de exibirem emissões unitárias mais baixas, o seu menor desempenho em serviço acaba por inviabilizar os ganhos obtidos com a introdução dos diferentes resíduos da sua constituição.

Quando se comparam os cenários, mais uma vez se verifica o enorme impacto que o aumento das distâncias dos materiais e do local de obra (cenário III) têm para os valores de emissões das diferentes misturas. Contudo, nenhuma alteração das tendências obtidas para o cenário I foi observada com as diferenças dos cenários estudados.

Com base nos resultados obtidos pode concluir-se que as espessuras das camadas betuminosas, ou seja, o desempenho mecânico das misturas à fadiga e os seus módulos de rigidez têm um impacto maior nas emissões finais do que a utilização ou não de material fresado. Por outras palavras, a necessidade de espessuras maiores de pavimento acarretam um grande impacto nas emissões finais de CO₂-equivalente, uma vez que há uma maior necessidade de transporte das misturas e de materiais o que acaba por minimizar as emissões que as misturas por si só apresentam.

Para além disso, pode ainda constatar-se que as misturas recicladas produzidas com betumes modificados com óleo de motor usado e HDPE ou SBS exibem as menores emissões devido à combinação do bom desempenho mecânico da mistura com a utilização de uma elevada taxa de reciclagem, que contribuem para a redução das emissões de CO₂-equivalente.

Pode assim concluir-se que algumas das misturas em estudo apresentam vantagens ambientais inerentes à redução da quantidade de betume novo, à utilização de resíduos como substitutos parciais e modificadores, à utilização de material fresado e às menores emissões de CO₂-equivalente, para além de vantagens económicas significativas. Deste modo é possível garantir que os betumes desenvolvidos neste estudo contribuem para o bom desempenho mecânico das misturas, aliando custos mais reduzidos com a elevada utilização de materiais reciclados sem com isso contribuir para maiores emissões ou produção de lixiviados perigosos para a saúde humana e para o ambiente. Deste modo, os betumes e as misturas desenvolvidos neste trabalho podem ser considerados mais sustentáveis, quer ao nível do desempenho mecânico, quer na vertente económica e ambiental.

9. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

9.1. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de betumes modificados inovadores usando elevadas quantidades de resíduos, nomeadamente óleo de motor usado ou fundo de coluna (como substitutos parciais do betume) e polímeros (resíduos plásticos e borracha de pneus usados) para a produção de misturas sustentáveis sem material fresado ou recicladas. Para atingir esse fim, o desempenho destas misturas deve ser igual ou superior ao observado em misturas de controlo similares produzidas com betumes comerciais. Estas misturas devem ainda ser viáveis a nível económico, e não devem acarretar riscos para a saúde humana e para o meio ambiente devido à utilização de resíduos.

Ao longo desta tese foram apresentados os diversos trabalhos realizados para se conseguir concretizar os objetivos propostos. A análise dos resultados obtidos durante esses trabalhos permitiu obter um conjunto de conclusões que são apresentadas nos parágrafos seguintes.

Inicialmente procedeu-se à caracterização do óleo de motor usado e do fundo de coluna, que foram utilizados neste estudo como substitutos parciais do betume. Ao estudar estes resíduos, verifica-se que o óleo de motor usado e o fundo de coluna são termicamente menos estáveis do que o betume base usado na modificação (B35/50). Para temperaturas típicas de produção dos betumes modificados (entre 170 e 180 °C), a perda de massa destes materiais foi reduzida (4% no óleo usado e 1% no fundo de coluna), não se prevendo desse modo alterações significativas das suas propriedades ao serem utilizados na modificação do betume base. Reologicamente, o fundo de coluna exibe maior viscosidade do que o óleo de motor usado, mas apenas para temperaturas inferiores a 150 °C. Assim, deverá ser possível utilizar uma maior quantidade de fundo de coluna na modificação de betumes.

O óleo de motor usado e o fundo de coluna apresentam uma composição química semelhante ao betume de controlo, pois todos estes materiais são de origem petrolífera. Contudo, o fundo de coluna apresenta maior envelhecimento químico, devido à presença de compostos de carbonilo e sulfóxido. Também se verificou que a concentração de metais pesados e outros contaminantes é superior no óleo de motor usado e no fundo de coluna (que exibiu o maior grau de contaminação) do que no betume base B35/50. No entanto, os valores obtidos não inviabilizam a utilização destes materiais, tendo por base alguns limites legais e outros estudos nos quais se utilizaram resíduos com maior grau de contaminação.

Quando se procedeu à modificação do betume base apenas com óleo de motor usado ou fundo de coluna, obteve-se valores de penetração elevados e baixos valores de temperatura de amolecimento e viscosidade, devido ao efeito que os óleos tiveram na diluição do betume. A nível reológico houve uma redução dos módulos de rigidez e das temperaturas mais elevadas do grau PG, enquanto o parâmetro de deformação não recuperada aumentou (pior desempenho à deformação permanente). Deste modo, pode concluir-se que estes substitutos parciais de betume não podem ser utilizados de forma isolada na modificação do betume, devido ao pior desempenho que esses ligantes apresentam. A introdução de polímeros foi assim utilizada para melhorar essas propriedades às temperaturas de serviço, nomeadamente o aumento da rigidez e a recuperação elástica.

Após introdução dos polímeros, a seleção do método de produção dos betumes modificados teve em conta a temperatura, tempo e método de digestão, assim como, a ordem de introdução dos diferentes materiais. A temperatura de produção (180 °C) baseou-se na revisão da literatura e nos resultados de DSC dos polímeros em estudo (HDPE, SBS e CR), para permitir a dispersão dos diferentes polímeros, sem oxidação dos mesmos. O tempo e método de digestão (misturador de alto ou baixo corte) foram avaliados através do ensaio de microscopia de fluorescência, verificando-se que o uso do misturador de alto corte apresenta várias vantagens (diminuição do tempo de digestão para 20 min, permite utilizar polímeros em grânulos e uma dispersão dos mesmos mais uniforme e eficaz). Nenhum dos métodos de digestão utilizados garantiu a estabilidade ao armazenamento dos betumes desenvolvidos, o que implica que estes betumes modificados tenham de ser produzidos junto à central betuminosa.

No que diz respeito à introdução dos diferentes materiais durante a produção dos betumes modificados, foram estudados dois procedimentos, cuja eficácia também foi avaliada através da análise microscópica dos ligantes obtidos. O método que permitiu obter uma dispersão mais homogênea do polímero, com presença de pequenas partículas corretamente dispersas no betume, foi o selecionado para produção dos diversos betumes modificados com resíduos. Esse método consistiu na adição do óleo de motor usado ao betume previamente aquecido a 160 °C, seguindo-se a introdução do polímero no misturador de baixo corte até esta mistura atingir os 180 °C. Em seguida, a mistura destes três componentes foi colocada no misturador de alto corte (6000-7200 rpm), durante 20 min, a cerca de 180 °C.

Ao avaliar as propriedades dos betumes modificados com óleo de motor usado e polímero, verificou-se que a quantidade de óleo de motor usado influencia principalmente os valores de penetração, enquanto a quantidade de polímero exerce maior influência na temperatura de amolecimento e viscosidade. Além

disso, ambos os materiais influenciam a resiliência. Assim, podem ser utilizadas diferentes combinações de óleo de motor usado e polímeros dependendo da utilização expetável destes betumes modificados.

Nesta fase do trabalho procurou seleccionar-se betumes modificados com óleo de motor usado e polímeros cujas características fossem enquadradas na classificação PMB45/80-60 e que, ao mesmo tempo, maximizassem a quantidade de resíduos utilizados. Assim, com base nas suas propriedades básicas foram seleccionados três betumes modificados com 6% HDPE e 10%, 12,5% ou 15% de óleo de motor usado (BO10H6, BO12,5H6 e BO15H6), dois betumes modificados com 5% de SBS e 7,5% ou 10% de óleo de motor usado (BO7,5S5 e BO10S5) e dois betumes modificados com 20% de borracha e 5% ou 7,5% de óleo de motor usado (BO5R20 e BO7,5R20) para posterior avaliação reológica.

Os ensaios reológicos permitem caracterizar de forma mais adequada os betumes modificados com resíduos e, como tal, foram usados para refinar a seleção desses betumes para posterior produção de misturas betuminosas do tipo SMA. Em geral, os betumes modificados com óleo de motor usado e polímeros exibem uma reduzida suscetibilidade térmica, com módulos complexos elevados a baixas frequências (elevadas temperaturas) e módulos complexos mais baixos a elevadas frequências (baixas temperaturas). A adição destes resíduos contribui para a redução da natureza viscosa do betume base (baixos ângulos de fase), conferindo-lhe uma maior flexibilidade a baixas temperaturas. Para além disso, estes betumes modificados com resíduos aumentam a temperatura mais elevada do grau PG, e reduzem o indicador de deformação permanente, melhorando a resistência à deformação permanente. No entanto, importa salientar que os betumes com maiores percentagens de óleo de motor usado são mais sensíveis à deformação permanente para níveis de tensão mais altos, e por isso não foram seleccionados para a produção de misturas betuminosas. Por fim, foram seleccionados para a produção das misturas SMA os betumes modificados BO10H6, BO7,5R20 e BO10S5, com os vários polímeros em estudo, pois exibiram um excelente comportamento reológico e utilizaram uma elevada quantidade de resíduos.

Após a seleção dos betumes modificados com óleo de motor usado e polímeros, foram produzidos betumes semelhantes com fundo de coluna (em vez de óleo de motor usado). As percentagens de fundo de coluna foram depois ajustadas de modo a obter betumes modificados que maximizassem a utilização de resíduos e apresentassem propriedades enquadradas na classificação PMB45/80-60. Esses betumes foram caracterizados ao nível das suas propriedades básicas, sendo possível constatar que os betumes modificados com fundo de coluna e polímeros apresentam menores valores de penetração do que os betumes similares modificados com óleo de motor usado. No que concerne aos valores de temperatura

de amolecimento, os betumes modificados com fundo de coluna exibem temperaturas de amolecimento mais elevadas ou similares aos betumes modificados com óleo de motor usado, e o mesmo tipo de comportamento pode ser verificado na análise dos resultados de viscosidade.

Assim, verifica-se que a maior viscosidade do fundo de coluna (relativamente ao óleo de motor usado) permite utilizar maiores quantidades do mesmo como substituto parcial do betume, sem comprometer as propriedades básicas dos betumes modificados. Deste modo, os betumes modificados com fundo de coluna e polímeros que aliam a maximização de resíduos com propriedades básicas similares ou superiores ao betume modificado de controlo foram o betume modificado com 15% de fundo de coluna e 6% de HDPE (BF15H6), o betume modificado com 12,5% de fundo de coluna e 5% de SBS (BF12,5S%) e o betume modificado com 15% de fundo de coluna e 20% de CR (BF15R20).

Ao nível da resistência ao envelhecimento (ensaio RTFOT) os betumes modificados com resíduos cumprem os requisitos de penetração conservada, aumento da temperatura de amolecimento e de variação de massa. Os betumes modificados com fundo de coluna exibem menor perda de massa do que os betumes com óleo de motor usado. O mesmo se verifica através do índice de carbonilo (obtido no ensaio FTIR), uma vez que o fundo de coluna melhora a resistência ao envelhecimento (índices de carbonilo mais baixos), retardando os processos de oxidação. Os betumes com óleo de motor e polímeros apresentaram um envelhecimento (índices de carbonilo) similar ao betume modificado comercial.

A estabilidade térmica dos betumes de controlo é ligeiramente superior à dos betumes modificados com resíduos. Isso não deverá ser um problema, pois o início de perda de massa dos betumes modificados com resíduos ocorre a temperaturas similares à do betume modificado comercial PMB45/80.

Quando se compara o efeito do óleo de motor e do fundo de coluna, pode concluir-se que é possível substituir maiores quantidades de betume pelo fundo de coluna sem comprometer o seu desempenho. Não tendo esse resíduo um uso alternativo, esta solução torna-se ainda mais interessante para a indústria da pavimentação rodoviária. No que diz respeito aos polímeros, apesar de todos apresentarem bons resultados, o polímero SBS aparenta ser a alternativa com melhor desempenho.

Quando aplicados em misturas betuminosas do tipo SMA, os betumes modificados com resíduos não necessitam da adição de fibras, uma vez que apresentam valores de escorrimento inferiores ao limite recomendado (0,2%), apesar da utilização do óleo de motor usado ou do fundo de coluna.

No que diz respeito às características mecânicas das misturas betuminosas SMA produzidas com os betumes modificados com resíduos, estas apresentam um bom desempenho à ação da água (valores de ITSR superiores a 80%, com exceção da mistura com fundo de coluna e borracha) e uma excelente resistência à deformação permanente, apresentando deformações muito inferiores à da mistura de controlo com betume modificado comercial. Além disso, os betumes modificados com HDPE e SBS, quer com óleo de motor, quer com fundo de coluna, aumentam a resistência à fadiga e o módulo de rigidez, mostrando-se excelentes soluções para dimensionamento de pavimentos em climas moderados a frios. A resistência à fadiga das misturas com borracha é mais baixa, mas este tipo de misturas podem ser uma mais-valia para climas quentes, devido à sua excelente resistência à deformação permanente.

A utilização de resíduos, e em especial o óleo de motor usado ou o fundo de coluna, reduzem ligeiramente os valores de resistência ao deslizamento das misturas SMA, mas todas as misturas cumprem o requisito exigido (60 unidades PTV). A macrotextura (valores de MPD) das misturas SMA com betumes modificados com resíduos foi em geral superior à recomendada para este tipo de misturas (1,0 mm).

No que diz respeito ao estudo de betumes modificados com resíduos a utilizar em misturas reciclados com 50% de material fresado, é necessário selecionar betumes modificados com elevada penetração para reduzir a penetração do betume envelhecido do material fresado. Definiu-se que estes devem maximizar a utilização de resíduos e apresentar propriedades enquadradas na classificação PMB75/130. Nesse pressuposto, inicialmente selecionaram-se os seguintes betumes modificados com óleo de motor usado e polímeros: os betumes modificados com 6% de HDPE e 15% ou 10% de óleo de motor usado (BO15H6 e BO20H6), os betumes modificados com 5% de SBS e 15% ou 10% de óleo de motor usado (BO15S5 e BO20S5) e os betumes modificados com 20% de CR e 15% ou 10% de óleo de motor usado (BO15R20 e BO20R20). Esses betumes serviram de referência para seleção de betumes similares modificados com fundo de coluna e polímeros, após ajuste (ligeiro aumento) da quantidade de fundo de coluna, nomeadamente: os betumes modificados com 6% de HDPE e 17,5% ou 20% fundo de coluna (BF17,5H6 e BF20H6), os betumes modificados com 5% de SBS e 17,5% ou 20% fundo de coluna (BF17,5S5 e BF20S5) e os betumes modificados com 20% de CR e 20% ou 22,5% de fundo de coluna (BF20R20 e BF22,5R20).

Em seguida foi necessário proceder à formulação *Marshall* da mistura reciclada antes de prosseguir com o estudo destes betumes. Essa fase foi essencial para se determinar qual a percentagem de betume envelhecido que efetivamente estava na mistura reciclada, bem como para definir a percentagem ótima

de betume da mistura reciclada (pois era necessário conhecer a proporção de betume modificado com resíduos e de betume envelhecido que existe na mistura reciclada). Além disso, nesta fase também se estudou o efeito da adição de diferentes percentagens do betume modificado com resíduos ao betume envelhecido, através da avaliação das propriedades básicas do betume resultante, que apresentou sempre penetrações compreendidas entre 35 e 70 décimas de milímetro. Este intervalo corresponde aos betumes usualmente utilizados em pavimentação, e foi tomado como referência para a fase seguinte.

Em seguida, os vários betumes modificados com resíduos, que tinham sido selecionados anteriormente, foram adicionados ao betume envelhecido na proporção definida na formulação da mistura reciclada, sendo depois avaliados através de ensaios de caracterização básica. O betume comercial de controlo B160/220 a utilizar nas misturas recicladas também foi avaliado nesta fase. As propriedades dos betumes modificados com resíduos das misturas recicladas demonstram que, ao adicionar o betume envelhecido, é possível utilizar uma maior quantidade de óleo usado ou fundo de coluna nos betumes modificados com resíduos para atingir valores de penetração esperados. A viscosidade e a temperatura de amolecimento destes betumes modificados das misturas recicladas são geralmente superiores ao utilizar fundo de coluna do que com óleo de motor usado. Apesar disso, esse aumento é inferior ao verificado nos betumes modificados com resíduos utilizados nas misturas sem material fresado. Em resumo, os betumes que melhor cumpriram os requisitos estabelecidos para utilização nas misturas recicladas (penetração entre 35 e 70 décimas de milímetro e que maximizem a utilização de resíduos) foram os seguintes: os betumes modificados com 6% de HDPE e 15% de óleo de motor usado ou 17,5% de fundo de coluna (BO15H6 e BF17,5H6), os betumes modificados com 5% de SBS e 15% de óleo de motor usado ou 17,5% de fundo de coluna (BO15S5 e BF17,5S5), e os betumes modificados com 20% de CR e 15% de óleo de motor usado ou 22,5% de fundo de coluna (BO15R20 e BF22,5R20).

Reologicamente, os betumes modificados com resíduos das misturas recicladas são pouco suscetíveis à variação da temperatura, na medida em que exibem valores de módulo complexo mais elevados a temperaturas mais altas e, módulos mais baixos a temperaturas mais baixas, comparativamente ao betume de controlo RB160/220 da mistura reciclada. Os betumes modificados com resíduos das misturas recicladas apresentam em geral temperaturas elevadas do grau PG superiores ao betume de controlo, e menores valores do indicador de deformação permanente (resistindo melhor à deformação).

A resistência ao envelhecimento (ensaio RTFOT) demonstrou que apenas o betume de controlo e os betumes modificados com SBS das misturas recicladas cumpriram a totalidade dos requisitos de

penetração conservada, aumento da temperatura de amolecimento e variação de massa exigidos. Além disso, os betumes modificados com fundo de coluna das misturas recicladas apresentam menores perdas de massa, tal como aconteceu nas misturas sem material fresado. Quando se analisa o envelhecimento através do índice de carbonilo (ensaio FTIR) constata-se que os betumes modificados com resíduos das misturas recicladas contribuem para retardar o processo de oxidação, na medida em que apresentam índices de carbonilo praticamente iguais após RTFOT. Para além disso, todos os betumes das misturas recicladas em análise (incluindo o de controlo) apresentam índices de carbonilo inferiores ao do betume envelhecido do material fresado, demonstrando a sua regeneração.

Os betumes modificados com HDPE e SBS da mistura reciclada têm melhor estabilidade térmica (início de perda de massa a maiores temperaturas) do que o betume de controlo. A presença do betume envelhecido terá contribuído para este resultado, que é diferente das misturas sem material fresado.

Ao serem aplicados em misturas SMA recicladas, os betumes modificados com resíduos não apresentam problemas de escorrimento. Embora se utilizem elevadas quantidades de óleo usado ou fundo de coluna, os valores de escorrimento obtidos são claramente inferiores ao limite (0,2%) recomendado para o efeito.

Relativamente às características mecânicas das misturas SMA recicladas produzidas com os betumes modificados com resíduos, verifica-se que as mesmas exibem um excelente comportamento de resistência à água (todos os valores de ITSr são superiores a 80%), em especial quando se utiliza óleo de motor usado. Além disso, as misturas SMA recicladas com os polímeros SBS e CR exibem módulos de rigidez elevados e baixos ângulos de fase a elevadas temperaturas (baixas frequências), o que já não se verificou de forma tão evidente nas misturas com HDPE.

Ao nível do desempenho à fadiga, as misturas SMA recicladas com óleo de motor usado e HDPE ou SBS (SMA-RBO15H6 e SMA-RBO15S5) apresentaram a maior resistência à fadiga. Por sua vez, as misturas SMA recicladas com borracha exibem o pior comportamento à fadiga. Notou-se ainda que a utilização de óleo de motor usado influencia de forma positiva a resistência à fadiga das misturas recicladas. Por sua vez, as misturas SMA recicladas exibem um comportamento oposto no que concerne à resistência à deformação permanente. Assim, embora todas as misturas recicladas tenham apresentado elevada resistência à deformação permanente, a mistura SMA-RBO15H6 teve o pior desempenho, enquanto a mistura SMA-RBF22,5R20 teve o melhor desempenho. De salientar que a utilização de fundo de coluna nas misturas recicladas conduz a uma melhoria do desempenho à deformação permanente.

As características superficiais das misturas SMA recicladas com os betumes modificados com resíduos têm uma adequada macrotextura, mas afetam negativamente a resistência ao deslizamento. De facto, os valores de macrotextura (MPD) das misturas SMA recicladas com betumes modificados com resíduos são sempre superiores ao valor típico dessas misturas (1,0 mm), com o fundo de coluna a apresentar os melhores resultados. No entanto, no caso da resistência ao deslizamento, as misturas SMA recicladas apresentam valores inferiores ao limite exigido (60 unidades PTV). Dado que a mistura SMA reciclada de controlo também não cumpre o valor exigido, depreende-se que este resultado não se relaciona com o tipo de betume usado, mas antes com a dificuldade em ajustar a granulometria destas misturas.

Uma mistura sustentável deve obedecer a três parâmetros fundamentais: i) apresentar bom desempenho mecânico; ii) ser economicamente viável; e, iii) não apresentar riscos para o ambiente. Depois de se ter verificado o bom desempenho mecânico das misturas SMA convencionais ou recicladas produzidas com os betumes modificados com resíduos, na fase seguinte do trabalho avaliou-se a viabilidade económica e ambiental, para se poder atingir os objetivos definidos para este estudo.

Assim, considerando os custos dos diferentes materiais utilizados na produção dos betumes modificados com resíduos, verificou-se que em geral esses betumes têm um custo inferior ao betume modificado comercial PMB45/80. Além disso, embora o custo desses betumes seja superior ao betume base 35/50, é preciso ter em consideração as suas propriedades superiores e as aparentes vantagens ambientais. Importa salientar que os betumes modificados com borracha de pneus usados têm o custo mais baixo, devido ao baixo custo desse resíduo em comparação com o HDPE e SBS.

Em seguida considerou-se o diferente desempenho das várias misturas em estudo, recorrendo ao dimensionamento de pavimentos com essas misturas, para que o custo e o desempenho das misturas com os betumes modificados com resíduos fossem considerados conjuntamente. No caso das misturas recicladas, todas as misturas com betumes modificados com resíduos exibem um custo inferior à estrutura de pavimento composta por misturas sem material fresado e com betume B35/50 (estrutura de controlo), dado que a utilização de material fresado reduz significativamente o custo dessas misturas. Ao comparar pavimentos com misturas recicladas produzidas com os betumes modificados com resíduos ou com o betume de controlo B160/220, apenas as misturas com óleo de motor usado e SBS ou HDPE exibem custos inferiores para os dois níveis de tráfego avaliados.

Entretanto, ao avaliar o custo das misturas sem material fresado e com os betumes modificados com resíduos para uma classe de tráfego elevada, verifica-se que o mesmo é em geral superior ao das misturas com o betume de controlo B35/50. Ao fazer a mesma análise para a classe de tráfego T3, a situação inverte-se, e apenas duas estruturas de pavimento produzidas com os betumes modificados B07,5R20 e BF12,5S5 exibiram um custo superior ao da estrutura de referência com betume B35/50. Em geral, importa salientar que as misturas modificadas com HDPE foram a solução mais promissora a nível económico.

Quanto às vantagens ambientais da utilização de diferentes resíduos na modificação do betume base e na produção das misturas recicladas, fez-se a análise de possíveis lixiviados perigosos suscetíveis de contaminar lençóis de água e análise das emissões de gases com efeito de estufa (CO_2). Ao analisar os lixiviados, todas as misturas betuminosas em estudo cumpriram os limites máximos indicados para os metais pesados avaliados. Apesar de se introduzirem vários resíduos nas misturas desenvolvidas, estes não resultam em lixiviados perigosos que possam acarretar riscos para o ambiente ou para a saúde humana. Além disso, há uma redução de recursos naturais consumidos e, ao mesmo tempo, dos depósitos em aterro de alguns dos resíduos utilizados.

Ao nível das emissões de CO_2 pode concluir-se que as misturas recicladas exibem menores emissões devido à utilização do material fresado e à redução da utilização de agregados e betume novos. Por sua vez, as misturas sem material fresado produzidas com betume modificado com resíduos apresentam menores emissões do que as misturas de controlo com betume modificado comercial, verificando-se assim que a introdução de resíduos nestas misturas contribui para uma redução das emissões de CO_2 .

Ao avaliar as emissões de CO_2 em estruturas de pavimentos equivalentes, observou-se que misturas com melhor desempenho originam camadas ligadas com menor espessura, e menores emissões de CO_2 . Este fator tem um maior impacto na redução das emissões de CO_2 do que a utilização de material fresado, em especial devido às menores emissões na fase de transporte. As misturas com HDPE e SBS foram as soluções ambientalmente mais vantajosas, bem como as misturas recicladas com óleo de motor usado.

Assim, neste trabalho desenvolveram-se betumes inovadores modificados com resíduos, que originaram misturas betuminosas mais sustentáveis, convencionais e recicladas, com um desempenho mecânico promissor, e com vantagens económicas e ambientais, o que permitiu atingir o objetivo deste trabalho.

9.2. Trabalhos futuros

No que concerne aos trabalhos futuros, seria importante avaliar a aplicação das diferentes misturas betuminosas à escala real, adequando a sua aplicação às características mecânicas obtidas nos ensaios de avaliação de desempenho. A aplicação à escala real permitiria perceber se as soluções desenvolvidas são viáveis para comercialização, através da avaliação da transposição das condições de laboratório para uma escala industrial. Para além disso, também permitiria avaliar o desempenho da mistura quando sujeita a ações reais de tráfego e de clima, que por vezes são mais adversas.

Outro fator importante a avaliar seria o desempenho das diferentes misturas com betumes modificados com resíduos, incluindo as misturas recicladas, para diferentes percentagens de betume. De facto, a formulação de algumas misturas desenvolvidas neste trabalho pode ser otimizada, para apresentarem melhor desempenho, como poderá ser o caso das misturas com borracha. Ainda relativamente às misturas, deve avaliar-se a utilização destes betumes modificados com resíduos em diferentes tipos de mistura, como por exemplo, em betões betuminosos para camadas de desgaste ou camadas de base e regularização, o que poderia dar origem a novas soluções para utilização destes ou outros resíduos.

No que diz respeito aos betumes modificados com óleo usado ou fundo de coluna e polímeros, poderia realizar-se um estudo mais aprofundado da influência das diferentes percentagens desses modificadores no desempenho do betume, de modo a catalogar os betumes tendo em conta as suas propriedades básicas. Para além disso, seria interessante explorar a possibilidade de tornar estes betumes mais estáveis ao armazenamento, melhorando a compatibilidade entre os diferentes materiais utilizados.

A avaliação dos metais pesados e outros contaminantes dos betumes modificados com resíduos também poderá ser alvo de estudos futuros, em especial caso se pretenda comercializar estes betumes. No entanto, poderá depreender-se o resultado desses ensaios, pois já foi realizada essa caracterização a alguns resíduos utilizados e às misturas betuminosas finais, cumprindo os limites exigidos.

Por último, sugere-se a avaliação futura das propriedades dos diferentes betumes modificados com resíduos a baixas temperaturas, nomeadamente através do ensaio *Bending Beam Rheometer* (BBR), de modo a aferir a temperatura mais baixa do grau PG, assim como parâmetros que indicam a capacidade dos betumes resistirem ao fendilhamento a baixas temperaturas. Neste estudo já se estimou o comportamento à deformação permanente dos betumes através das suas propriedades reológicas, mas

seria interessante estimar também o seu comportamento à fadiga, sugerindo-se a realização do ensaio denominado *Linear Amplitude Sweep* (LAS), que tem sido utilizado para indicar a resistência dos betumes ao dano provocado pela fadiga após envelhecimento RFTOT ou PAV.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, L. (2017). *Aplicação de betume-espuma e rejuvenescedores em misturas betuminosas recicladas - desenvolvimento de soluções para otimização do seu desempenho*, Universidade do Minho, Guimarães.
- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R., Abdelaziz, M., Shafigh, P. (2011). Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt, *Materials & Design*, Vol. 32 (10), pp. 4844-4849.
- Ahmedzade, P. (2013). The investigation and comparison effects of SBS and SBS with new reactive terpolymer on the rheological properties of bitumen, *Construction and Building Materials*, Vol. 38, pp. 285-291.
- Airey, G.D. (2002). Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens, *Construction and Building Materials*, Vol. 16 (8), pp. 473-487.
- Al-Hadidy, A.I., Yi-Qiu, T. (2009). Effect of polyethylene on life of flexible pavements, *Construction and Building Materials*, Vol. 23 (3), pp. 1456-1464.
- Anjan kumar, S., Veeraragavan, A. (2011). Dynamic mechanical characterization of asphalt concrete mixes with modified asphalt binders, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528 (21), pp. 6445-6454.
- Araújo, J.R., Waldman, W.R., De Paoli, M.A. (2008). Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 93 (10), pp. 1770-1775.
- ARRA (2001). *Basic Asphalt Recycling Manual*, Asphalt Recycling and Reclaiming Association, United States of America.
- Arslan, D., Gürü, M., Çubuk, M.K., Çubuk, M. (2011). Improvement of bitumen and bituminous mixtures performances by triethylene glycol based synthetic polyboron, *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (10), pp. 3863-3868.
- Asli, H., Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R. (2012). Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder, *Construction and Building Materials*, Vol. 37 (0), pp. 398-405.
- Asphalt Institute (2001). *Superpave® mix design*, third ed, Lexington, KY.
- Asphalt Institute (2003). *Superpave®: Performance graded asphalt binder specification and testing*, third ed.

- Attaelmanan, M., Feng, C.P., Ai, A.-H. (2011). Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier, *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (5), pp. 2764-2770.
- Baptista, A.M.C. (2006). *Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central Contribuição para o seu estudo e aplicação* Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Becker, Y., Méndez, M.P., Rodríguez, Y. (2001). Polymer Modified Asphalt, *Vision Tecnológica* (1), pp. 39-50.
- Blazejowski, K. (2011). *Stone matrix asphalt - Theory and Practice*, Boca Raton: CRC Press.
- Bower, D.I. (2004). *An Introduction to Polymer Physics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Branco, F., Pereira, P., Picado, L. (2006). *Pavimentos Rodoviários*, Edições Almedina, Coimbra.
- Bredin, A., Larcher, A.V., Mullins, B.J. (2011). Thermogravimetric analysis of carbon black and engine soot—Towards a more robust oil analysis method, *Tribology International*, Vol. 44 (12), pp. 1642-1650.
- Brown, E.R., Kandhal, P.S., Roberts, F.L., Kim, Y.R., Lee, D.-Y., Kennedy, T.W. (2009). *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*, NAPA Research and Education Foundation.
- Casey, D., McNally, C., Gibney, A., Gilchrist, M.D. (2008). Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 52 (10), pp. 1167-1174.
- Celauro, B., Celauro, C., Lo Presti, D., Bevilacqua, A. (2012). Definition of a laboratory optimization protocol for road bitumen improved with recycled tire rubber, *Construction and Building Materials*, Vol. 37, pp. 562-572.
- Chen, F., Qian, J. (2003). Studies of the thermal degradation of waste rubber, *Waste Management*, Vol. 23 (6), pp. 463-467.
- Chen, M., Xiao, F., Putman, B., Leng, B., Wu, S. (2014). High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils, *Construction and Building Materials*, Vol. 59 (0), pp. 10-16.
- Chena, H., Xu, Q., Chena, S., Zhang, Z. (2009). Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures, *Materials & Design*, Vol. 30 (7), pp. 2595-2603.
- Chesner, W., Collins, R., MacKay, M., Emery, J. (1998). *The User Guidelines for Waste and Byproduct Material in Pavement Construction - Scrap Tires*, Turner-Fairbanks, FHWA-RD-97-148, Highway Research Center, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation

- Contat-Rodrigo, L., Ribes-Greus, A., Imrie, C.T. (2002). Thermal analysis of high-density polyethylene and low-density polyethylene with enhanced biodegradability, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 86 (3), pp. 764-772.
- Costa, L., Fernandes, S., Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M. (2013a). Valorização de resíduos plásticos na modificação de betumes para pavimentos rodoviários *7º Congresso Rodoviário Português*.
- Costa, L.M.B., Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Fernandes, S.R.M. (2013b). Incorporation of waste plastic in asphalt binders to improve their performance in the pavement, *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 6 (4), pp. 457-464.
- Crawford, R.J. (1985). *Plastics and rubbers: engineering design and applications* Mechanical Engineering Publications, London.
- Crawford, R.J. (1992). *Plastics engineering*, 2nd ed, Pergamon Press, Oxford.
- Cuadri, A.A., Carrera, V., Izquierdo, M.A., García-Morales, M., Navarro, F.J. (2014). Bitumen modifiers for reduced temperature asphalts: A comparative analysis between three polymeric and non-polymeric additives, *Construction and Building Materials*, Vol. 51 (0), pp. 82-88.
- D'Angelo, J.A., Grzybowski, K., Lewis, S. (2012). *Asphalt binder modification with re-refined heavy vacuum distillation oil (RHVDO)* Proceedings of Canadian Technical Asphalt Association, p. 257-275.
- D'Angelo, J.A., Grzybowski, K., Lewis, S., Walker, R. (2013). *Evaluation of the Performance Properties of Asphalt Mixes Produced with Re-refined Heavy Vacuum Distillate Bottoms*, Proceedings of Canadian Technical Asphalt Association, p. 273-290.
- Dasgupta, S., Agrawal, S.L., Bandyopadhyay, S., Chakraborty, S., Mukhopadhyay, R., Malkani, R.K., Ameta, S.C. (2007). Characterization of eco-friendly processing aids for rubber compound, *Polymer Testing*, Vol. 26 (4), pp. 489-500.
- DeDene, C.D., You, Z., (2014). The Performance of Aged Asphalt Materials Rejuvenated with Waste Engine Oil, *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 7 (2), pp. 145-152.
- Dehouche, N., Kaci, M., Mokhtar, K.A. (2012). Influence of thermo-oxidative aging on chemical composition and physical properties of polymer modified bitumens, *Construction and Building Materials*, Vol. 26 (1), pp. 350-356.
- Dessouky, S., Contreras, D., Sanchez, J., Papagiannakis, A.T., Abbas, A. (2013). Influence of hindered phenol additives on the rheology of aged polymer-modified bitumen, *Construction and Building Materials*, Vol. 38, pp. 214-223.

- Dominghaus, H. (1993). *Plastics for engineers : materials, properties, applications*, Hanser Publishers ed.
- Dong, D., Huang, X., Li, X., Zhang, L. (2012). Swelling process of rubber in asphalt and its effect on the structure and properties of rubber and asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol. 29, pp. 316-322.
- Dony, A., Colin, J., Bruneau, D., Drouadaine, I., Navaro, J. (2013). Reclaimed asphalt concretes with high recycling rates: Changes in reclaimed binder properties according to rejuvenating agent, *Construction and Building Materials*, Vol. 41 (0), pp. 175-181.
- Drobny, J.G. (2007). *Handbook of Thermoplastic Elastomers*, Elsevier Science.
- EAPA (1998). *Heavy Duty Surfaces: The Arguments for SMA* European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- EAPA (2011). *Asphalt in Figures 2011*, 27-12-2013, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- EAPA (2012). *Asphalt in Figures 2012*, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- EAPA (2015). *Asphalt in Figures 2015*, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- EP (2009). *Caderno de Encargos Tipo Obra*, Capítulo 1403 - Pavimentação - Características dos Materiais, Estradas de Portugal, S.A.; Acedido em 27/06/2013.
- EP (2014). *Caderno de Encargos Tipo Obra*, Capítulo 15.03 - Pavimentação - Métodos Construtivos, 23/02/2017, Estradas de Portugal, S.A., Almada, Portugal.
- Epps, A., Harvey, J.T., Kim, Y.R., Roque, R. (2003). Structural Requirements of Bituminous Paving Mixtures *TRB Transportation Research Board Millennium Papers A2D04 Committee on Characteristics of Bituminous Paving Mixtures to Meet Structural Requirements*.
- ETRMA (2015). *End-of-life Tyre Report 2015*, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- European Commission (2016). *Environment Waste*, http://ec.europa.eu/environment/waste/oil_index.htm; Acedido em 29/12/2016.
- Fang, C., Liu, P., Yu, R., Liu, X. (2014). Preparation process to affect stability in waste polyethylene-modified bitumen, *Construction and Building Materials*, Vol. 54, pp. 320-325.

- Fernández-Berridi, M.J., González, N., Mugica, A., Bernicot, C. (2006). Pyrolysis-FTIR and TGA techniques as tools in the characterization of blends of natural rubber and SBR, *Thermochimica Acta*, Vol. 444 (1), pp. 65-70.
- Ferreira, C.I.G. (2009). *Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas* Universidade do Minho, Braga.
- Fontes, L.P.T.L., Trichês, G., Pais, J.C., Pereira, P.A.A. (2010). Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 24 (7), pp. 1193-1200.
- Formela, K., Klein, M., Colom, X., Saeb, M.R. (2015). Investigating the combined impact of plasticizer and shear force on the efficiency of low temperature reclaiming of ground tire rubber (GTR), *Polymer Degradation and Stability*.
- Fuentes-Audén, C., Martínez-Boza, F.J., Navarro, F.J., Partal, P., Gallegos, C. (2007). Formulation of new synthetic binders: Thermo-mechanical properties of recycled polymer/oil blends, *Polymer Testing*, Vol. 26 (3), pp. 323-332.
- Fuentes-Audén, C., Sandoval, J.A., Jerez, A., Navarro, F.J., Martínez-Boza, F.J., Partal, P., Gallegos, C. (2008). Evaluation of thermal and mechanical properties of recycled polyethylene modified bitumen, *Polymer Testing*, Vol. 27 (8), pp. 1005-1012.
- Gabbott, P. (2008). *Principles and Applications of Thermal Analysis*, Blackwell.
- García-Morales, M., Partal, P., Navarro, F.J., Gallegos, C. (2006). Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen, *Fuel*, Vol. 85 (7–8), pp. 936-943.
- García-Morales, M., Partal, P., Navarro, F.J., Martínez-Boza, F., Gallegos, C., González, N., González, O., Muñoz, M.E. (2004). Viscous properties and microstructure of recycled eva modified bitumen, *Fuel*, Vol. 83 (1), pp. 31-38.
- García, Á., Schlangen, E., van de Ven, M. (2011). Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete, *Fuel*, Vol. 90 (2), pp. 583-591.
- Garcia, J., Hansen, K. (2001). *HMA Pavement Mix Type Selection Guide*, Information Series 128, National Asphalt Pavement Association (NAPA) and Federal Highways Administration (FHWA).
- Gardete, D., Santos, L.P., Capitão, S. (2011). Formulação volumétrica e desempenho de misturas betuminosas stone mastic asphalt, *XVI CILA - Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto*, Rio de Janeiro, Brasil.

- Garforth, F., Stancliffe, A. (1994). *Polymers: Post 16 Chemistry Courses: Information and Activity Book*, University of York, Polymer Industry Education Centre.
- Ghavibazoo, A., Abdelrahman, M. (2013). Composition analysis of crumb rubber during interaction with asphalt and effect on properties of binder, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 14 (5), pp. 517-530.
- González, V., Martínez-Boza, F.J., Gallegos, C., Pérez-Lepe, A., Páez, A. (2012). A study into the processing of bitumen modified with tire crumb rubber and polymeric additives, *Fuel Processing Technology*, Vol. 95 (0), pp. 137-143.
- Gulmine, J.V., Janissek, P.R., Heise, H.M., Akcelrud, L. (2002). Polyethylene characterization by FTIR, *Polymer Testing*, Vol. 21 (5), pp. 557-563.
- Harper, C.A. (1975). *Handbook of plastics and elastomers*, McGraw-Hill, New York.
- Hassim, S., Harahap, R.K., Muniandy, R., Kadir, M.R.A., Mahmud, A.R. (2005). Cost Comparison between Stone Mastic Asphalt and Asphalt Concrete Wearing Course, *American Journal of Applied Sciences*, Vol. 2 (9), pp. 1350-1355.
- Hesp, S.A.M., Shurvell, H.F. (2010). X-ray fluorescence detection of waste engine oil residue in asphalt and its effect on cracking in service, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 11 (6), pp. 541-553.
- Hinisloğlu, S., Ağar, E. (2004). Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials Letters*, Vol. 58 (3-4), pp. 267-271.
- Holden, G., Legge, N.R., Quirk, R., Schroeder, H.E. (1996). *Thermoplastics Elastomers*, 2 ed, Hanser, Munich.
- INIR (2012). *Construção e Reabilitação de pavimentos - Reciclagem de Pavimentos*, Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias IP.
- Institute, A. (2016). *State-of-the-knowledge The use of REOB/VTAE in asphalt*, Is-235, Asphalt Institute; Acedido em 02/03/2017.
- Jia, X., Huang, B., Bowers, B.F., Zhao, S. (2014). Infrared spectra and rheological properties of asphalt cement containing waste engine oil residues, *Construction and Building Materials*, Vol. 50 (0), pp. 683-691.
- Kalantar, Z.N., Karim, M.R., Mahrez, A. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement, *Construction and Building Materials*, Vol. 33, pp. 55-62.

- Kamaruddin, N.H.M., Hainin, M.R., Hassan, N.A., Abdullah, M.E. (2014). Rutting Evaluation of Aged Binder Containing Waste Engine Oil, *Advanced Materials Research*, Vol. 911, pp. 405-409.
- Karlsson, R., Isacson, U. (2006). Material-related aspects of asphalt recycling - State-of-the-art, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18 (1), pp. 81-92.
- Kennedy, J.E., Lyons, J.G., Geever, L.M., Higginbotham, C.L. (2009). Synthesis and characterisation of styrene butadiene styrene-g-acrylic acid for potential use in biomedical applications, *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 29 (5), pp. 1655-1661.
- Kogbara, R.B., Masad, E.A., Kassem, E., Scarpas, A., Anupam, K. (2016). A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements, *Construction and Building Materials*, Vol. 114, pp. 602-617.
- Kök, B.V., Çolak, H. (2011). Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (8), pp. 3204-3212.
- Larsen, D.O., Alessandrini, J.L., Bosch, A., Cortizo, M.S. (2009). Micro-structural and rheological characteristics of SBS-asphalt blends during their manufacturing, *Construction and Building Materials*, Vol. 23 (8), pp. 2769-2774.
- Leng, Z., Al-Qadi, I.L., Cao, R. (2017). Life-cycle economic and environmental assessment of warm stone mastic asphalt, *Transportmetrica A: Transport Science*, pp. 1-14.
- Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 145 (1-2), pp. 42-82.
- Li, X., Gibson, N., Andriescu, A., S. Arnold, T. (2017). Performance evaluation of REOB-modified asphalt binders and mixtures, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 18 (sup1), pp. 128-153.
- Liang, M., Xin, X., Fan, W., Sun, H., Yao, Y., Xing, B. (2015). Viscous properties, storage stability and their relationships with microstructure of tire scrap rubber modified asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol. 74 (0), pp. 124-131.
- Lo Presti, D. (2013). Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review, *Construction and Building Materials*, Vol. 49, pp. 863-881.
- Lo Presti, D., Fecarotti, C., Clare, A.T., Airey, G. (2014). Toward more realistic viscosity measurements of tyre rubber-bitumen blends, *Construction and Building Materials*, Vol. 67, Part B, pp. 270-278.

- Lopez, E., Allue, C.G., Chifflet, P., Serrada, C.G. (2011). A new life for bitumen. A recent innovation for the regeneration of the aged bitumen in hot mix asphalt, *World congress Mexique*, Mexique.
- MACOPAV (1995). *Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional* Junta Autónoma das Estradas (JAE).
- Mano, E.B. (1985). *Introdução a polímeros*, Brasil.
- Martinho, F. (2004). *Reciclagem de pavimentos - Estado da arte, situação portuguesa e selecção do processo construtivo*, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Martinho, F., Lanchas, S., Nunez, R., Batista, F., Miranda, H. (2013). A experiência portuguesa em misturas betuminosas do tipo SMA com fibras celulósicas, *VII Congresso Rodoviário Português - Estradas 2013*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Metwally, M.A.R.M., Williams, R.C. (2010). *Development of Non-Petroleum Based Binders for Use in Flexible Pavements* Institute for Transportation, Iowa.
- Miranda, H., Batista, F., Antunes, M.d.L., Neve, J. (2013). Análise comparativa de métodos de ensaio para avaliação do escoamento, em misturas betuminosas do tipo Stone Matic Asphalt, segundo a norma europeia EN 12697-18, *VII Congresso Rodoviário Português - Estradas 2013*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Mogawer, W.S., Austerman, A., Al-Qadi, I.L., Buttlar, W., Ozer, H., Hill, B. (2017). Using binder and mixture space diagrams to evaluate the effect of re-refined engine oil bottoms on binders and mixtures after ageing, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 18 (sup1), pp. 154-182.
- Mooney, K. (2015). *Re-Refined Engine Oil Bottoms: Don't Jump on the "Banned"- Wagon Too Quickly*. *News Bulletin: Re-Refined Engine Oil Bottoms*, Association of Modified Asphalt Producers. HollyFrontier Refining & Marketing, LLC, <http://modifiedasphalt.org/news-bulletin-reob/>; Acedido em 10/08/2017.
- Moreno, F., Rubio, M.C., Martinez-Echevarria, M.J. (2011). Analysis of digestion time and the crumb rubber percentage in dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes, *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (5), pp. 2323-2334.
- Mukherjee, A. (2016). *Life Cycle Assessment of Asphalt Mixtures in Support of an Environmental Product Declaration*, National Asphalt Pavement Association.
- Muniandy, R., Binti Che Md Akhir, N.A., Hassim, S., Moazami, D. (2014). Laboratory fatigue evaluation of modified and unmodified asphalt binders in Stone Mastic Asphalt mixtures using a newly developed crack meander technique, *International Journal of Fatigue*, Vol. 59, pp. 1-8.

- Munteanu, S.B., Brebu, M., Vasile, C. (2005). Thermal and thermo-oxidative behaviour of butadiene–styrene copolymers with different architectures, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 89 (3), pp. 501-512.
- NAPA (2002). *Designing and Constructing SMA Mixtures—State-of-the-Practice. Quality Improvement Series 122*, National Asphalt Pavement Association, Lanham, Maryland.
- Navarro, F.J., Partal, P., Martínez-Boza, F., Valencia, C., Gallegos, C. (2002). Rheological characteristics of ground tire rubber-modified bitumens, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 89 (1–3), pp. 53-61.
- Oliveira, J.R.M. (2003). Reciclagem de pavimentos flexíveis - Caracterização mecânica de misturas betuminosas recicladas a quente, *Universidade do Minho*.
- Omari, I., Aggarwal, V., Hesp, S. (2016). Investigation of two Warm Mix Asphalt additives, *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 9 (2), pp. 83-88.
- Osswald, T.A., Menges, G. (1996). *Materials Science of Polymers for Engineers*, Hanser Publishers.
- Ould-Henia, M., Dumont, A.-G. (2006). *Assessment of the rheological properties of asphalt rubber binder and its residual phases*, Proc, Asphalt Rubber 2006 Conference, p. 931-948.
- Ouyang, C., Wang, S., Zhang, Y., Zhang, Y. (2006). Improving the aging resistance of asphalt by addition of Zinc dialkyldithiophosphate, *Fuel*, Vol. 85 (7–8), pp. 1060-1066.
- Palha, D., Fonseca, P., Abreu, L., Silva, H., Oliveira, J. (2013). Solutions to improve the recycling rate and quality of plant produced hot mix asphalt, *WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities*, Braga, Portugal.
- Paliukaite, M., Assuras, M., Hesp, S.A.M. (2016). Effect of recycled engine oil bottoms on the ductile failure properties of straight and polymer-modified asphalt cements, *Construction and Building Materials*, Vol. 126, pp. 190-196.
- Pandey, A. (2006). *Microwave Assisted Synthesis of Biodegradable Polymers, Blends and Composites: Potentials for Drug Delivery and Orthopedic Applications*, University of Texas at Arlington.
- Pavement Interactive (2011). *Dynamic Shear Rheometer*, <http://www.pavementinteractive.org/article/dynamic-shear-rheometer/>; Acedido em 29/12/2013.
- Peralta, E.J.F. (2013). *Analysis of Physicochemical Interaction between the Components of Asphalt Mixtures with Rubber* Universidade do Minho, Guimarães.

- Peralta, J., Silva, H.M.R.D., Hilliou, L., MacHado, A.V., Pais, J., Christopher Williams, R. (2012). Mutual changes in bitumen and rubber related to the production of asphalt rubber binders, *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 557-565.
- Peralta, J., Williams, R.C., Silva, H.M.R.D., Machado, A.V. (2013). Combining asphalt-rubber (AR) and fast-pyrolysis bio-il to create a binder for flexible pavements, *WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities*, Braga, Portugal.
- Pereira, P.A., Santos, L.P. (2006). Technical-economical evaluation of pavement recycling alternatives, *Third Gulf Conference on Roads (TGCR06)*, Oman.
- Pérez-Lepe, A., Martínez-Boza, F.J., Gallegos, C., González, O., Muñoz, M.E., Santamaría, A. (2003). Influence of the processing conditions on the rheological behaviour of polymer-modified bitumen☆, *Fuel*, Vol. 82 (11), pp. 1339-1348.
- PlasticsEurope, EuPC, EuPR, EPRO (2012). *Plastic - the Facts 2012 An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2011, 27-12-2013*, PlasticsEurope, European Plastics Converters, European Plastics Recyclers e European Association of Plastics Recycling and Recovery Organisations.
- Prasertsri, S., Lagarde, F., Rattanasom, N., Sirisinha, C., Daniel, P. (2013). Raman spectroscopy and thermal analysis of gum and silica-filled NR/SBR blends prepared from latex system, *Polymer Testing*, Vol. 32 (5), pp. 852-861.
- Putman, B.J., Amirkhanian, S.N. (2006). *Crumb rubber modification of binders: interaction and particle effects*, Proceedings of the Asphalt Rubber 2006 Conference, p. 655-677.
- Ramísio, P. (2007). *Retenção de Metais Pesados de Escorrências Rodoviárias por Filtração Reactiva*, Universidade do Minho, Guimarães.
- Rauckyte, T., Hargreaves, D.J., Pawlak, Z. (2006). Determination of heavy metals and volatile aromatic compounds in used engine oils and sludges, *Fuel*, Vol. 85 (4), pp. 481-485.
- Recipneu (2017). *Company, Products and Technology*. Recipneu, Empresa Nacional de Reciclagem de Pneus, <http://www.recipneu.com>; Acedido em 13/09/2017.
- Reschner, K. (2008). *Scrap Tire Recycling - A Summary of Prevalent Disposal and Recycling Methods*. Berlin., http://www.entire-engineering.de/Scrap_Tire_Recycling.pdf; Acedido em 13/09/2017.
- Reyes-Ortiz, O., Berardinelli, E., Alvarez, A.E., Carvajal-Muñoz, J.S., Fuentes, L.G. (2012). Evaluation of Hot Mix Asphalt Mixtures with Replacement of Aggregates by Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Material, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 53 (0), pp. 379-388.

- Roberts, F.L., Brown, E.R., Lee, D., Kennedy, T.W. (1991). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*, National Asphalt Pavement Association (NAPA) Educational Foundation
- Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.-Y., Kennedy, T.W. (1996). *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction*, Transportation Research Board, Lanham, MD
- Romera, R., Santamaria, A., Peña, J.J., Muñoz, M.E., Barral, M., García, E., Jañez, V. (2006). Rheological aspects of the rejuvenation of aged bitumen, *Rheologica Acta*, Vol. 45 (4), pp. 474-478.
- Rosen, S.L. (1982). *Fundamental Principles of Polymeric Materials*, John Wiley & Sons, New York.
- Rubab, S., Burke, K., Wright, L., Hesp, S.A., Marks, P., Raymond, C. (2011). *Effects of engine oil residues on asphalt cement quality*, CTAA annual conference proceedings-Canadian Technical Asphalt Association, p. 1.
- Saechtling, H. (1995). *International plastics handbook : for the technologist, engineer and user / Saechtling*, 3 ed, Munich.
- Sarang, G., Lekha, B.M., Geethu, J.S., Shankar, A.U.R. (2015a). Laboratory performance of stone matrix asphalt mixtures with two aggregate gradations, *Journal of Modern Transportation*, Vol. 23 (2), pp. 130-136.
- Sarang, G., Lekha, B.M., Krishna, G., Ravi Shankar, A.U. (2015b). Comparison of Stone Matrix Asphalt mixtures with polymer-modified bitumen and shredded waste plastics, *Road Materials and Pavement Design*, pp. 1-13.
- Sengoz, B., Isikyakar, G. (2008). Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen, *Construction and Building Materials*, Vol. 22 (9), pp. 1897-1905.
- Sengoz, B., Oylumluoglu, J. (2013). Utilization of recycled asphalt concrete with different warm mix asphalt additives prepared with different penetration grades bitumen, *Construction and Building Materials*, Vol. 45 (0), pp. 173-183.
- Serrano, E., Zubeldia, A., Larrañaga, M., Remiro, P., Mondragon, I. (2004). Effect of different thermal treatments on the self-assembled nanostructures of a styrene-butadiene-styrene star block copolymer, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 83 (3), pp. 495-507.
- Shell International Petroleum Company, I. (1978). *Shell Pavement Design Manual: Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic*, Shell International Petroleum Company.

- Shi, J., Zou, H., Ding, L., Li, X., Jiang, K., Chen, T., Zhang, X., Zhang, L., Ren, D. (2014). Continuous production of liquid reclaimed rubber from ground tire rubber and its application as reactive polymeric plasticizer, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 99, pp. 166-175.
- Shu, X., Huang, B. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview, *Construction and Building Materials*, Vol. 67, Part B (0), pp. 217-224.
- Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Jesus, C.M.G. (2012). Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 60, pp. 38-48.
- Sogilub (2016). *Relatório de Atividades 2016*, Sociedade de Gestão Integrada de Óleos Lubrificantes Usados, <http://www.sogilub.pt/documentos/resumora2016.pdf>; Acedido em 11-08-2017.
- Sousa, J.B. (1997). *Avaliação dos Métodos de Ensaio e Especificações SHRP na Europa. Volume II. Formulação das Misturas e Caracterização do Trecho Piloto*, Junta Autónoma de Estradas, Almada.
- Thives, L.P., Ghisi, E. (2017). Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 72 (Supplement C), pp. 473-484.
- Thodesen, C., Shatanawi, K., Amirkhanian, S. (2009). Effect of crumb rubber characteristics on crumb rubber modified (CRM) binder viscosity, *Construction and Building Materials*, Vol. 23 (1), pp. 295-303.
- Uçar, S., Özkan, A.R., Karagöz, S. (2016). Co-pyrolysis of waste polyolefins with waste motor oil, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 119, pp. 233-241.
- US Department of Energy, Office of Fossil Energy (2016). *Used Oil Re-refining Study to Address Energy Policy Act of 2005 Section 1838*, 02/03/2017.
- Vaiana, R., Capiluppi, G.F., Gallelli, V., Iuele, T., Minani, V. (2012). Pavement Surface Performances Evolution: an Experimental Application, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 53, pp. 1149-1160.
- Valle, O., Qiao, Y., Dave, E., Mo, W. (2017). Life cycle assessment of pavements under a changing climate, *Pavement LCA Conference 2017*, Illinois.
- Vargas, M.A., Vargas, M.A., Sánchez-Sólis, A., Manero, O. (2013). Asphalt/polyethylene blends: Rheological properties, microstructure and viscosity modeling, *Construction and Building Materials*, Vol. 45 (0), pp. 243-250.

- Vasudevan, R., Ramalinga Chandra Sekar, A., Sundarakannan, B., Velkennedy, R. (2012). A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – Application in construction of flexible pavements, *Construction and Building Materials*, Vol. 28 (1), pp. 311-320.
- White, P., Golden, J.S., Biligiri, K.P., Kaloush, K. (2010). Modeling climate change impacts of pavement production and construction, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 54 (11), pp. 776-782.
- Widyatmoko, I., Elliott, R. (2008). Characteristics of elastomeric and plastomeric binders in contact with natural asphalts, *Construction and Building Materials*, Vol. 22 (3), pp. 239-249.
- Wielinski, J., Kriech, A., Huber, G., Horton, A., Osborn, L. (2015). Analysis of vacuum tower asphalt extender and effect on bitumen and asphalt properties, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 16 (sup1), pp. 90-110.
- Woodward, D., Millar, P., Lantieri, C., Sangiorgi, C., Vignali, V. (2016). The wear of Stone Mastic Asphalt due to slow speed high stress simulated laboratory trafficking, *Construction and Building Materials*, Vol. 110, pp. 270-277.
- Wu, J.-H., Li, C.-H., Wu, Y.-T., Leu, M.-T., Tsai, Y. (2010). Thermal resistance and dynamic damping properties of poly (styrene–butadiene–styrene)/thermoplastic polyurethane composites elastomer material, *Composites Science and Technology*, Vol. 70 (8), pp. 1258-1264.
- Wu, S.-p., Pang, L., Mo, L.-t., Chen, Y.-c., Zhu, G.-j. (2009). Influence of aging on the evolution of structure, morphology and rheology of base and SBS modified bitumen, *Construction and Building Materials*, Vol. 23 (2), pp. 1005-1010.
- Yang, R., Kang, S., Ozer, H., Al-Qadi, I.L. (2015). Environmental and economic analyses of recycled asphalt concrete mixtures based on material production and potential performance, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 104 (Part A), pp. 141-151.
- Yao, H., You, Z., Li, L., Goh, S.W., Lee, C.H., Yap, Y.K., Shi, X. (2013). Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy, *Construction and Building Materials*, Vol. 38, pp. 327-337.
- Yildirim, Y. (2007). Polymer modified asphalt binders, *Construction and Building Materials*, Vol. 21 (1), pp. 66-72.
- Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H., Karim, M.R. (2012). Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 233–234, pp. 254-258.

- Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R. (2014). 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 92 (0), pp. 230-245.
- Zhang, F., Hu, C. (2015). The research for structural characteristics and modification mechanism of crumb rubber compound modified asphalts, *Construction and Building Materials*, Vol. 76, pp. 330-342.
- Zhang, F., Yu, J., Han, J. (2011). Effects of thermal oxidative ageing on dynamic viscosity, TG/DTG, DTA and FTIR of SBS- and SBS/sulfur-modified asphalts, *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (1), pp. 129-137.
- Zoorob, S.E., Castro-Gomes, J.P., Pereira Oliveira, L.A., O'Connell, J. (2012). Investigating the Multiple Stress Creep Recovery bitumen characterisation test, *Construction and Building Materials*, Vol. 30 (0), pp. 734-745.
- Zoorob, S.E., Mturi, G.A., Sangiorgi, C., Dinis-Almeida, M., Habib, N.Z. (2018). Fluxing as a new tool for bitumen rheological characterization and the use of time-concentration shift factor (ac), *Construction and Building Materials*, Vol. 158 (Supplement C), pp. 691-699.